ENGENHARIA, GESTÃO E INOVAÇÃO

ORGANIZADORES

ALINE MARA OLIVEIRA

OSVALDO SENA GUIMARÃES

VOLUME 11

Editora Poisson

Aline Mara Oliveira
Osvaldo Sena Guimarães
(Organizadores)

Engenharia, Gestão e Inovação
Volume 11

1ª Edição

Belo Horizonte
Poisson
2023

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial
Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais
MSc. Davilson Eduardo Andrade
Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas
MSc. Fabiane dos Santos
Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia
Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC
Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy
MSc. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57
Engenharia, Gestão e Inovação – Volume 11/
Organizadores:Aline Mara Oliveira,Osvaldo Sena Guimarães – Belo Horizonte - MG: Editora Poisson, 2023

Formato: PDF
ISBN: 978-65-5866-343-0
DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0

Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia

1. Engenharia 2. Educação. I. OLIVEIRA, Aline Mara II. GUIMARÃES,Osvaldo Sena III. Título.

CDD-620

Sônia Márcia Soares de Moura – CRB 6/1896

O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.
Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterada.

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

Esse e outros títulos podem ser baixados gratuitamente em www.poisson.com.br
Entre em contato pelo contato@poisson.com.br

SUMÁRIO

Capítulo 1: Aplicações práticas: gerador de funções com amplificador operacional. 07

Filipe Carvalho de Andrade, Mikelly Bonfim Anjos, Kiara Bonella Scaramussa, José Victor Cardoso Lacerda, Joseane Oliveira da Silva, Edson Costa Oliveira, Estefani Maria Barreto Montenegro, Anna Maria de Medeiros Gomes Oliveira, Giselle Francine Brito Muniz

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.01

Capítulo 2: Projeto de modulação por largura de pulso (PWM) com amplificadores operacionais: protótipo e funcionamento 21

Giselle Francine Brito Muniz, Bruno Moura dos Santos Miranda, Edson Costa Oliveira, Ana Carolina Dias Brito, Filipe Carvalho de Andrade, Lukas Luan Florencio Pereira, Mikelly Bonfim Anjos, Jonas Souza Pinto, Joseane Oliveira da Silva

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.02

Capítulo 3: Amplificadores operacionais em aplicações de medição de tensão: projeto de um voltímetro 34

Estefani Maria Barreto Montenegro, Jonas Souza Pinto, Cláudio Júnior Neves Sousa, Jornando Prado de Oliveira Santos, Anderson de Oliveira Castro Correia, Joseane Oliveira da Silva, Anna Maria de Medeiros Gomes Oliveira, Bruno Moura dos Santos Miranda

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.03

Capítulo 4: Avanços recentes em aplicações de biossensores 50

Cleiton Bittencourt da Porciúncula, Bruna Sulzbacher Fischer, Acelia Patrícia Buboltz da Silva Santos, Catharine Venturineli dos Santos, Fabiana de Campos Fiorucci, Sérgio Gilberto Becker, Lucas Machado Câmara, Marina da Cunha Sieben

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.04

Capítulo 5: Projeto, construção e caracterização da Bobina de Rogowski com diferentes números de voltas: uma análise comparativa por meio de ensaios laboratoriais..... 111

Erika Brito Correia, Leonardo Souza Caires, Ítalo Cardoso Mota, Diego Habib Santos Nolasco

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.05

Capítulo 6: Desenvolvimento de um sistema de monitoramento do consumo de energia elétrica: uma ferramenta para o uso eficiente de energia no setor residencial..... 127

Amanda Sahory Nunes Serafim, Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella, Sophia Victória Santos

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.06

SUMÁRIO

Capítulo 7: Materiais para produção de células solares: revisão integrativa 143

Magno de Lima Silva, Kessi Jhony de Araújo Silva, Beatriz da Silva Carvalho, Geremias de Sousa Rodrigues, Marcos Coelho Rodrigues, Mateus de Sousa Rodrigues, Maria Lúcia da Silva Rodrigues

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.07

Capítulo 8: Características técnicas de eletropostos alimentados com energia solar fotovoltaica 153

Mayara Cordeiro França

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.08

Capítulo 9: Otimização no transporte urbano: uma simulação intermodal com ênfase na eficiência energética 171

Shadia Silveira Assaf Bortolazzo, João Eugênio Cavallazzi, Amir Mattar Valente

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.09

Capítulo 10: Robótica colaborativa: a contribuição das máquinas para uma nova revolução industrial 185

Everton Ruggeri Silva Araújo, Eduarda Caldas dos Prazeres, Rodrigo Rafael Campos da Silva de Souza, Aline Patricia Monteiro Lino

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.10

Capítulo 11: Estudo da dissolução de poliestireno expandido utilizando solventes e resíduos terpênicos 205

Mônica Beatriz Kolicheski, Ana Paula Lucca Ribeiro

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.11

Capítulo 12: Otimização estrutural de escadas de concreto armado 224

Keitson Jales de Medeiros, João Victor da Silva Oliveira, Eduardo Morais de Medeiros

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.12

Capítulo 13: Panorama dos acidentes de trabalho no Brasil e no setor da construção civil 247

Fábio Brandão Britto, Gilsia Fabiane Oliveira Morais, Anderson Nascimento do Vasco, Aroldo Hitoshi Otsuka

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.13

SUMÁRIO

Capítulo 14: São Paulo, cidade das águas: interfaces entre a engenharia e a gestão urbana nas obras hidráulicas dos séculos XIX e XX 259

Saide Kahtouni

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.14

Capítulo 15: Estudos de confiabilidade: análise do tempo de vida útil de feixes tubulares de trocadores de calor 278

Jancler Adriano Pereira Nicácio

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.15

Capítulo 16: Organização de conteúdo em mídia social: busca e análise de vídeos sobre ferramentas da qualidade no setor de saúde e logística 301

Leandro Mendonça Lalli Peron, Vanderli Correia, Lívia Gregorio Takemura, Nathalie Cristiny Pereira Lopes

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.16

Capítulo 17: Gestão informatizada de Kanban de requisição e *Milk-Run*: um estudo de caso aplicado em uma empresa do segmento metalmecânico 315

Evandro Segundo Soares Pereira

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.17

Capítulo 18: Estudo sobre o mapeamento de processos na melhoria do arranjo físico em uma microcervejaria 340

Bruna Grassetti Fonseca, Mariângela Catelani Souza, Luciana Nogueira, Nathan Gouveia Tamarozzi, Victor Luiz Lopes, William Moraes de Assis

DOI: 10.36229/978-65-5866-343-0.CAP.18

Autores 359

Capítulo 1

Aplicações práticas: gerador de funções com amplificador operacional

Filipe Carvalho de Andrade
Mikelly Bonfim Anjos
Kiara Bonella Scaramussa
José Victor Cardoso Lacerda
Joseane Oliveira da Silva
Edson Costa Oliveira
Estefani Maria Barreto Montenegro
Anna Maria de Medeiros Gomes Oliveira
Giselle Francine Brito Muniz

Resumo: Este estudo visa implementar e analisar um gerador de funções utilizando um circuito com amplificador operacional LM741. Procedimentos práticos foram conduzidos com materiais específicos, como fonte de tensão ajustável, gerador de funções e osciloscópio. O circuito, dividido em três estágios, gerou ondas senoidais, quadradas e triangulares. A simulação no NI Multisim precedeu a montagem prática, revelando a necessidade de acoplamentos para otimizar o desempenho. A modelagem no Protheus, com destaque para o plano terra em PCBs, foi abordada. A conclusão destaca a aplicação prática dos conceitos teóricos, evidenciando a resolução de desafios práticos.

Palavras-Chave: Gerador de Funções, Circuitos Eletrônicos, NI Multisim, Eletrônica Aplicada.

1. INTRODUÇÃO

Os geradores de sinais são dispositivos eletrônicos que produzem formas de onda com características específicas, como frequência, amplitude, forma e duração. Esses sinais são utilizados em diversas aplicações, como testes de equipamentos, comunicações, controle, modulação, síntese de som, entre outras. Os geradores de sinais podem ser classificados em analógicos ou digitais, dependendo da natureza do sinal produzido. Os geradores analógicos produzem sinais contínuos, como senoidais, quadradas e triangulares, enquanto os geradores digitais produzem sinais discretos, como pulsos e códigos (EMBARCADOS, 2023, p. 1).

Um dos principais componentes utilizados na construção de geradores de sinais é o amplificador operacional, ou amp-op, que é um circuito integrado capaz de realizar operações matemáticas com sinais elétricos, como soma, subtração, multiplicação, divisão, integração e diferenciação. O amp-op possui duas entradas, uma inversora e uma não-inversora, e uma saída, que é a diferença entre as tensões aplicadas nas entradas multiplicada por um ganho elevado.

O amp-op pode ser configurado de diferentes formas, dependendo dos componentes externos conectados às suas entradas e saída, como resistores, capacitores, diodos, transistores, etc. Essas configurações determinam o comportamento e a função do amp-op no circuito. Algumas das configurações mais comuns são: inversor, não-inversor, somador, subtrator, comparador, integrador, diferenciador, oscilador, filtro, retificador, etc (EMBARCADOS, 2023, p. 2).

Um dos exemplos de aplicação do amp-op como gerador de sinais é o oscilador ponte de Wien, que é um circuito capaz de gerar uma onda senoidal com frequência e amplitude estáveis. O oscilador ponte de Wien é formado por um amp-op não-inversor, uma rede RC série-paralelo que determina a frequência do sinal, e dois diodos zener que limitam a amplitude do sinal. O oscilador ponte de Wien possui uma realimentação positiva, que garante a oscilação do sinal, e uma realimentação negativa, que controla o ganho do amp-op.

Outro exemplo de aplicação do amp-op como gerador de sinais é o disparador Schmitt, que é um circuito capaz de gerar uma onda quadrada a partir de um sinal de entrada variável. O disparador Schmitt é formado por um amp-op inversor, dois resistores que formam um divisor de tensão, e um resistor de realimentação que determina o ganho do amp-op. O disparador Schmitt possui uma histerese, que é a diferença entre os níveis de tensão que fazem o amp-op mudar de estado. A histerese evita que o amp-op oscile entre os estados quando o sinal de entrada está próximo dos níveis de tensão (BRAGA, 2023).

Um terceiro exemplo de aplicação do amp-op como gerador de sinais é o integrador, que é um circuito capaz de gerar uma onda triangular a partir de uma onda quadrada. O integrador é formado por um amp-op inversor, um resistor na entrada e um capacitor na saída. O integrador realiza a operação matemática de integração, que é equivalente a calcular a área sob a curva do sinal de entrada. Assim, quando o sinal de entrada é uma onda quadrada, o sinal de saída é uma onda triangular, que representa a variação da área em função do tempo.

O objetivo deste trabalho é apresentar o projeto, a montagem e a análise de um gerador de funções básicas, que é um circuito capaz de gerar uma onda senoidal, uma onda quadrada e uma onda triangular, utilizando amp-ops e outros componentes eletrônicos. O gerador de funções básicas é composto por três estágios: o primeiro é o oscilador ponte

de Wien, que gera a onda senoidal; o segundo é o disparador Schmitt, que gera a onda quadrada a partir da onda senoidal; e o terceiro é o integrador, que gera a onda triangular a partir da onda quadrada. O trabalho também descreve os procedimentos e os resultados obtidos na realização do experimento, bem como as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Há um aumento da necessidade de se gerar sinais com formas padronizadas, haja vista a ampla utilização desses sinais nos sistemas de controle e comunicação. Para geração desses sinais utilizam-se circuitos conhecidos como não-lineares que geram formas de onda quadrada, triangular, pulso, entre outras.

Segundo Alves (2023), um gerador elementar de funções é um circuito capaz de gerar uma senoide, uma onda quadrada e uma triangular. Podemos gerar um sinal senoidal através de um circuito conhecido como Ponte de Wien.

O Oscilador Ponte de Wien é uma das configurações RC mais utilizadas na geração de sinais de baixas frequências. A frequência é determinada pela rede série/paralelo dos resistores e capacitores iguais respectivamente. A fonte de alimentação deve ser simétrica e os diodos zener, que determinam a amplitude do sinal, devem ter tensões que, somadas, sejam menores do que a alimentação utilizada. Esse circuito opera com tensões menores e conta com o auxílio de potenciômetro para ajuste de distorção da forma de onda.

Se aplicarmos um sinal senoidal num circuito disparador Schimitt teremos um gerador de funções básicas, quadrada e senoidal.

Segundo Schmitt (1938), o disparador Schmitt ou Schmitt trigger, como também é conhecido, é um tipo de circuito biestável largamente empregado nos circuitos eletrônicos digitais. Diferente de um circuito convencional onde a troca de estados requer uma transição rápida aplicada à entrada, como a troca de estados no disparador Schmitt ocorre no momento em que o sinal de entrada atinge um determinado nível, independentemente de sua forma de variação no tempo. A saída do disparador Schmitt se mantém em um estado estável até que a tensão de entrada atinja o valor limite no instante de tempo t = t0. Quando isso ocorre, a tensão de saída muda abruptamente de valor, o que corresponde à mudança de estado do disparador.

Se a onda quadrada fornecida pelo disparador Schimitt for aplicada em um circuito integrador, tem-se, na saída do mesmo, uma onda triangular. Um circuito integrador fornece na saída uma tensão que é proporcional à área sob a curva que define o sinal.

3. PROCEDIMENTOS E ANÁLISE

Para realizar os procedimentos e a análise do circuito gerador de sinais, foi seguida o procedimento de separação dos circuitos. Primeiramente, foi montado o primeiro estágio do circuito, que consiste em um oscilador de relaxação modificado, capaz de gerar uma onda senoidal de saída. Em seguida, foi montado o segundo estágio, que é um disparador de Schmitt, que converte a onda senoidal de entrada em uma onda quadrada de saída. Por fim, foi montado o terceiro estágio, que é um circuito integrador, que transforma a onda quadrada de entrada em uma onda triangular de saída. Os resultados obtidos foram observados e registrados por meio do osciloscópio, que permitiu visualizar as formas de onda de cada estágio. Os parâmetros das ondas, como amplitude, frequência e período,

foram medidos e comparados com os valores teóricos esperados. A seguir, são apresentados os procedimentos realizados assim como a análise dos resultados obtidos.

3.1. CIRCUITO COMPLETO

Inicialmente foi realizada a seleção dos materiais e equipamentos necessários para a montagem e análise do experimento, os materiais foram escolhidos com base na literatura, sendo eles:

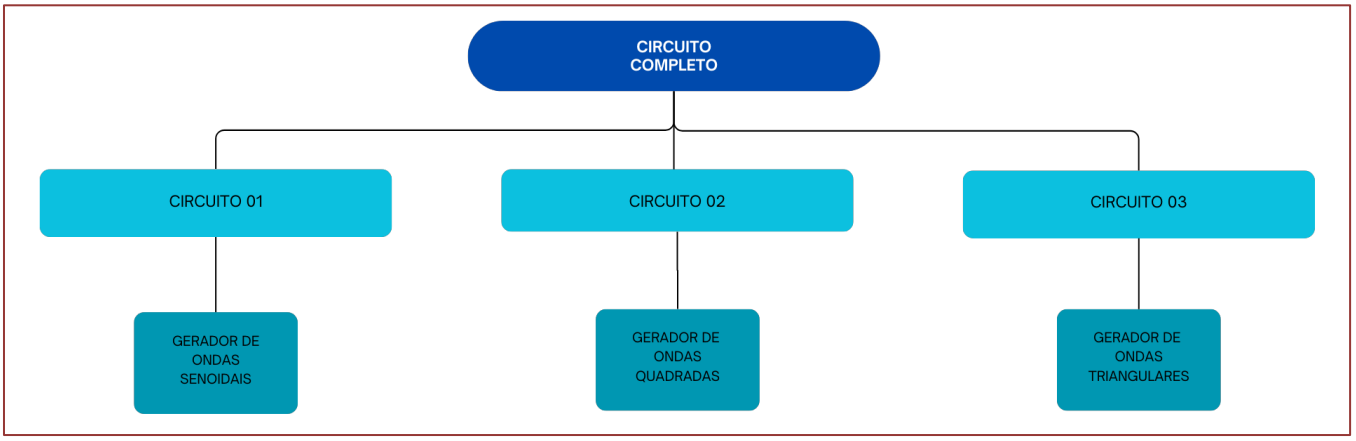
- 01 - Fonte de Tensão DC ajustável;
- 01 - Gerador de Funções;
- 01 - Osciloscópio;
- 01 - Multímetro;
- 03 - Cabos com garra (tipo jacaré) para fonte;
- 01 - Cabo BNC do gerador de funções;
- 01 - Ponta de Prova de osciloscópio;
- 01 - Ponta de Prova de multímetro;
- 04 - Protoboards;
- 03 - Amp-Op LM741;
- 02 - Diodos 1N914;
- 09 - Resistores: 1kW, 4 x 10kW, 47kW, 100kW, 470kW, 1MW;
- 03 - Potenciômetro 1kW, 5kW, 10kW;
- 01 - Capacitores de 2,2nF (Cerâmicos);
- 02 - Capacitores de 0,01µF (Cerâmicos).

Com a seleção feita, foi iniciada as disposições de cabos junto ao multímetro, fonte de alimentação, osciloscópio e gerador de funções, de modo a possibilitar a calibração dos equipamentos e verificação dos componentes do circuito.

Posteriormente, foi ajustada a fonte, em modo série, para 15 V, em seguida, foi verificada a precisão da fonte através do multímetro. Logo após, verificou-se as pontas de prova do osciloscópio que foram conectadas ao gancho de calibragem, onde foi possível analisar as ondas quadradas com 2 Vpp.

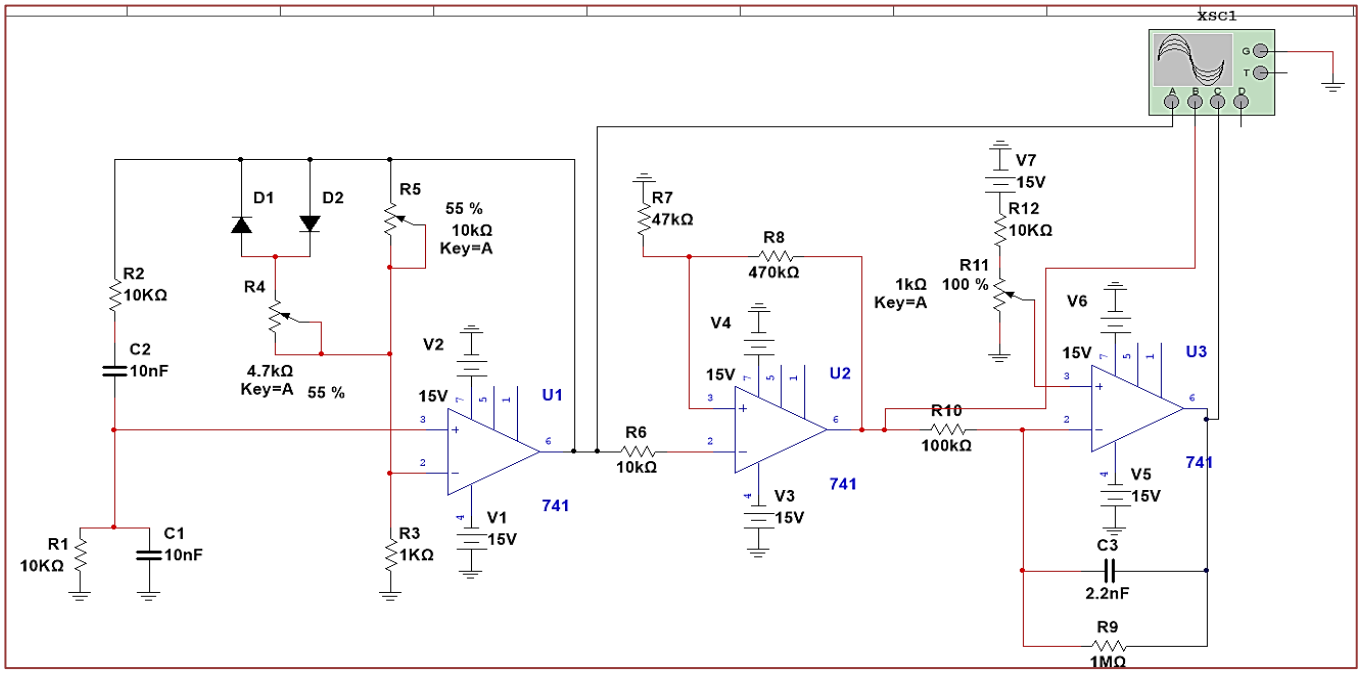
Primordialmente o circuito completo foi dividido em 3 principais estágios, sendo o primeiro responsável pela geração da onda senoidal, o segunda da quadrada e o terceiro da triangular, como mostrado na Figura 1.

Figura 1: Modelo esquemático



Fonte: Autoria Própria.

Figura 2: Circuito completo - Gerador de Sinais

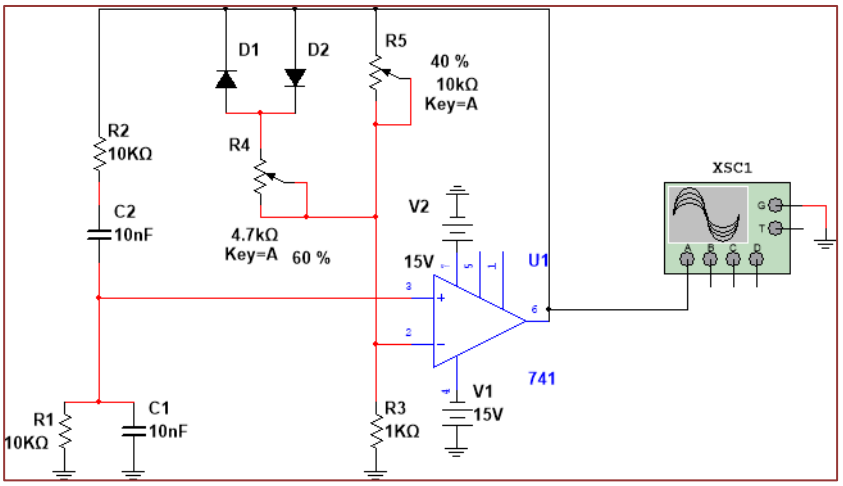


Fonte: Autoria Própria.

3.2. PRIMEIRO ESTÁGIO

Nesse estágio foi construído um circuito que irá fornecer uma onda senoidal, a partir da esquematização do circuito gerador de forma de onda da Figura 1, a saída deste estágio trata-se de uma onda senoidal, como visto na teoria de circuitos não lineares. Os indicadores desse circuito estão representados na Figura 3.

Figura 3: Primeiro estágio - Oscilador de relaxação modificado

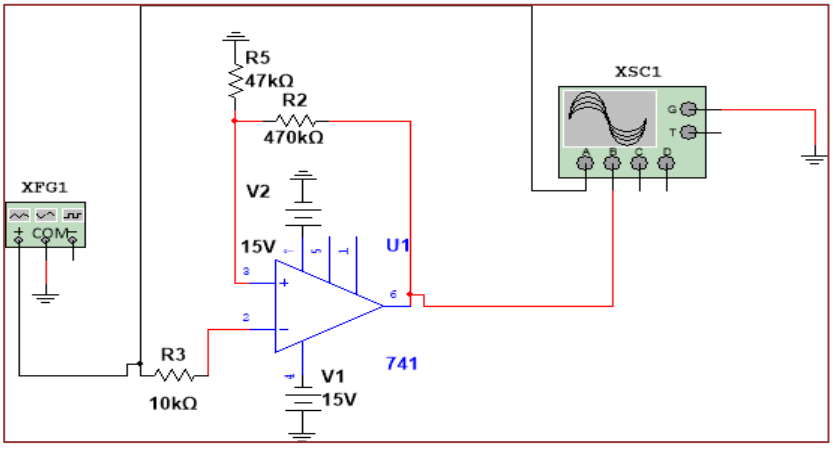


Fonte: Autoria Própria.

3.3. SEGUNDO ESTÁGIO

Nesse estágio foi construído um circuito disparador de Schmitt, o qual por meio de uma entrada senoidal (Vin), gera para sua saída uma forma de onda quadrada (Vout). Os parâmetros desse circuito são ilustrados na Figura 4.

Figura 4: Segundo estágio - Disparador Schmitt Trigger

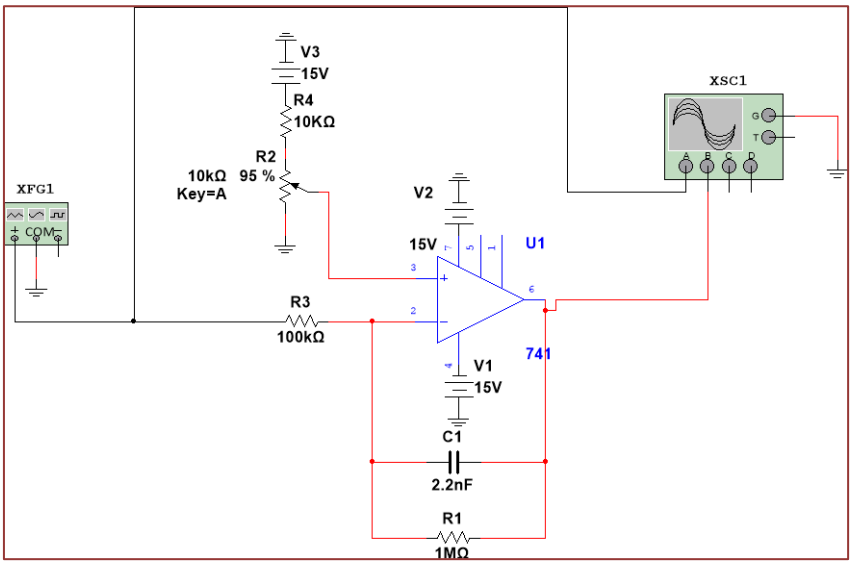


Fonte: Autoria Própria.

3.4. TERCEIRO ESTÁGIO

No terceiro estágio foi utilizado um circuito integrador para obter uma onda triangular de saída por meio de uma onda quadrada de entrada. Os parâmetros do circuito estão representados na Figura 5.

Figura 5: Terceiro estágio - integrador



Fonte: Autoria Própria.

3.5. ACOPLAMENTO

Por conta da interferência entre as etapas do circuito foi necessário realizar o acoplamento entre os estágios, o acoplamento tem como objetivo garantir uma boa transferência do sinal, evitando perdas e distorções. Foram utilizados resistores para realizar o casamento de impedância, sendo que do primeiro estágio para o segundo foi utilizado um resistor de 10 kΩ e do segundo estágio para o terceiro foi utilizado um resistor de 100 kΩ. Posteriormente, a fim de melhorar o acoplamento entre os segundo e terceiro estágio, foi utilizado um amplificador operacional como buffer para isolar as etapas 2 e 3.

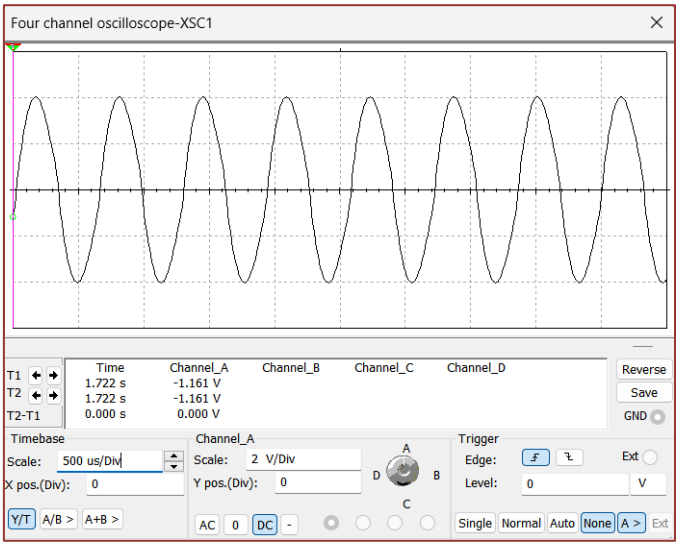
4. ANÁLISE DE DADOS

A análise de dados consistiu em comparar os resultados obtidos na simulação e no projeto do circuito gerador de sinais, verificando se há concordância entre os valores teóricos e experimentais. Para isso, foi utilizado como parâmetro as formas de onda que foram medidos pelo osciloscópio e pelo Multisim. Além disso, serão discutidos os possíveis fatores que podem ter causado diferenças ou erros nos resultados, como as tolerâncias dos componentes, as interferências externas, as limitações dos equipamentos e as aproximações teóricas. A seguir, são apresentadas os dados obtidos e a análise de cada estágio do circuito.

4.1. DADOS SIMULADOS

Foi utilizado o NI Multisim (Multisim) para simular a etapa 01 do projeto. Após a montagem do circuito, como mostrada na Figura 3, foram realizadas as medições do sinal de saída do primeiro circuito, em preto (Figura 6).

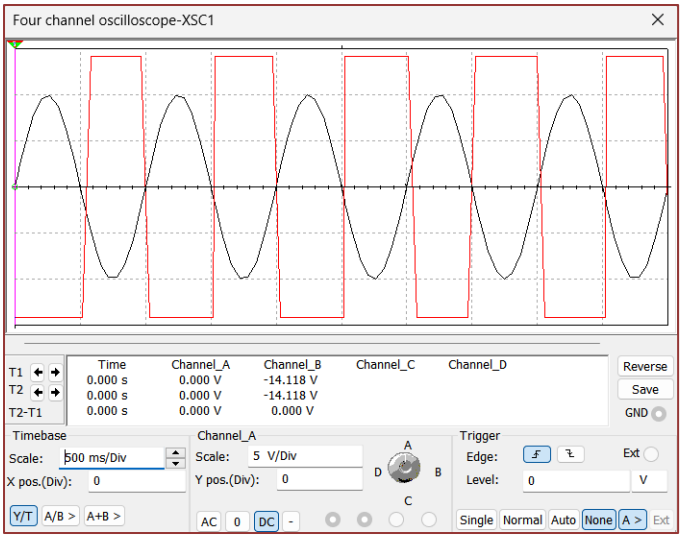
Figura 6: Oscilador de Relaxação Modificado - Simulação



Fonte: Autoria Própria.

Em seguida, para simular a etapa 02 do projeto. Após a montagem do circuito, como mostrada na Figura 4, foram realizadas as medições do sinal de saída do primeiro circuito, em preto a entrada e em vermelho, a saída (Figura 7).

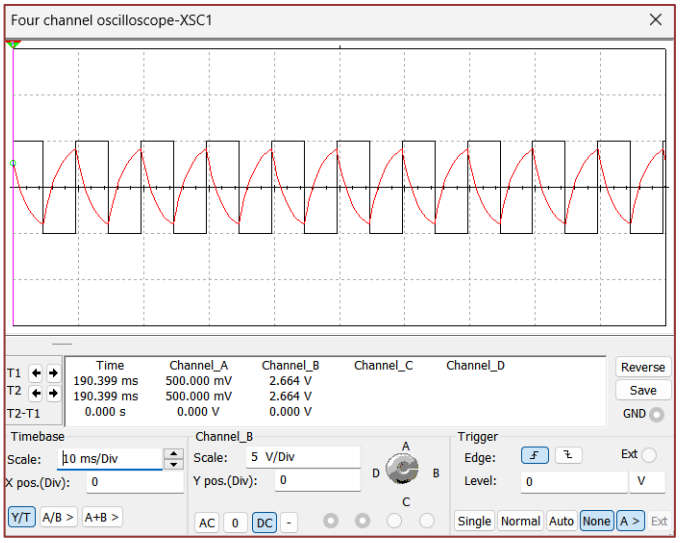
Figura 7: Disparador Schmitt Trigger - Simulação



Fonte: Autoria Própria.

E finalmente, para simular a etapa 03 do projeto. Após a montagem do circuito, como mostrada na Figura 5, foram realizadas as medições do sinal de saída do primeiro circuito, em preto a entrada e em vermelho, a saída (Figura 8).

Figura 8: Integrador - Simulação

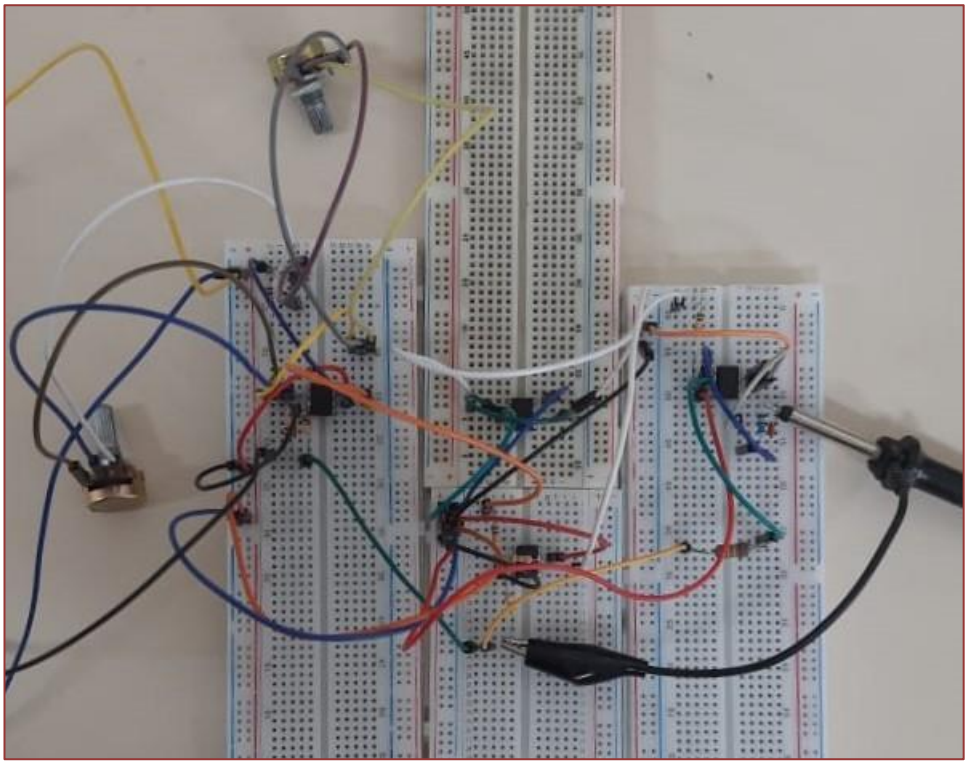


Fonte: Autoria Própria.

4.2. DADOS OBTIDOS

Inicialmente, após todo o circuito (Figura 9) ser montado, foram dispostos os equipamentos do laboratório que seriam utilizados para verificar as formas de onda provenientes do gerador de sinais.

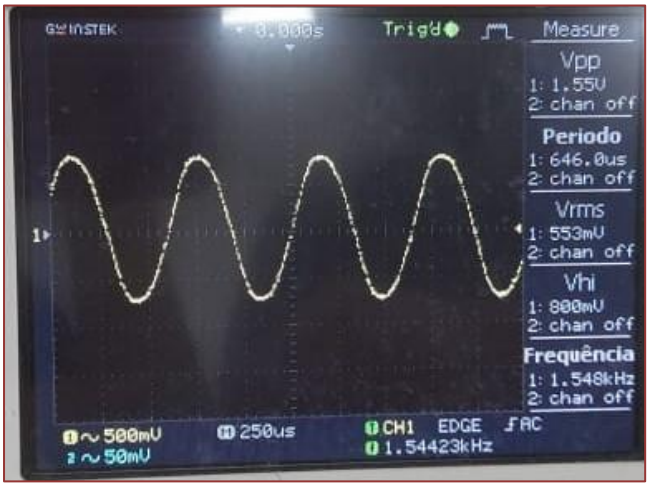
Figura 9: Gerador de Sinais - Projeto



Fonte: Autoria Própria.

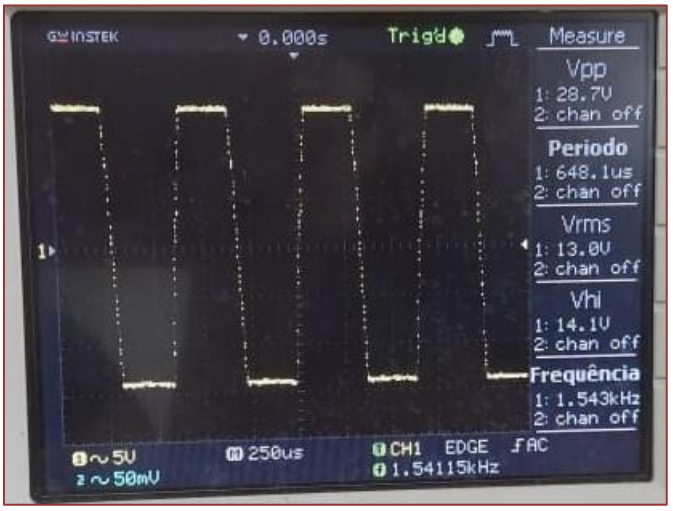
Posteriormente, foi possível verificar por meio do osciloscópio a forma de onda proveniente de cada circuito, sendo elas respectivamente, senoidal (Figura 10), quadrada (Figura 11) e triangular (Figura 12).

Figura 10: Oscilador de Relaxação Modificado - Projeto



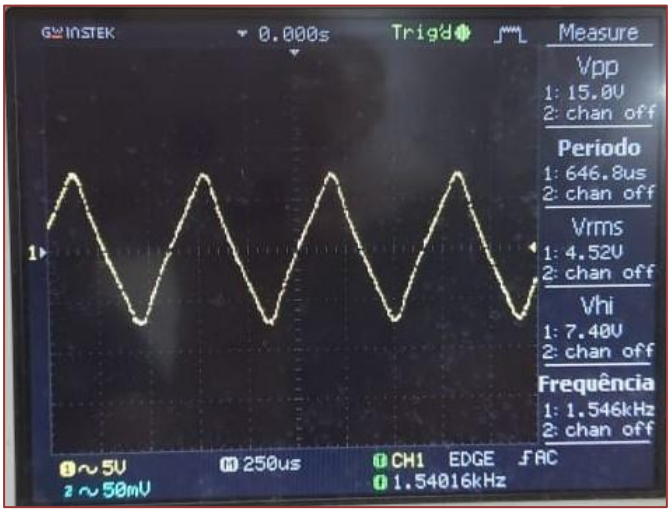
Fonte: Autoria Própria.

Figura 11: Disparador Schmitt Trigger - Projeto



Fonte: Autoria Própria.

Figura 12: Integrador - Projeto



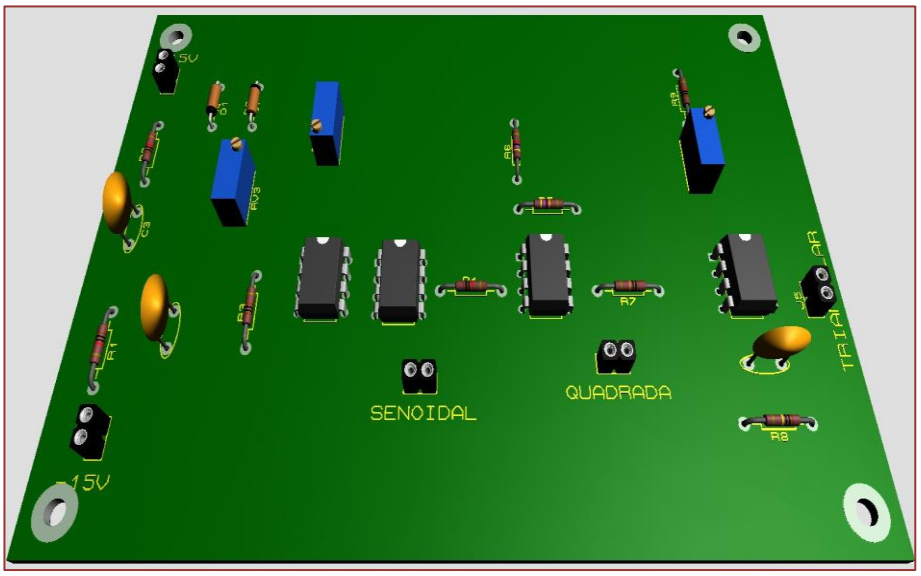
Fonte: Autoria Própria.

5. MODELAGEM COMPUTACIONAL DO CIRCUITO

O Protheus é um software amplamente utilizado na confecção de placas de circuito impresso (PCBs), oferecendo uma variedade de recursos e ferramentas para auxiliar no projeto e na pro- totipagem de circuitos eletrônicos. Ao projetar o gerador de sinais com amplificador operacional LM741, foi escolhido o Protheus para a criação do layout da placa.

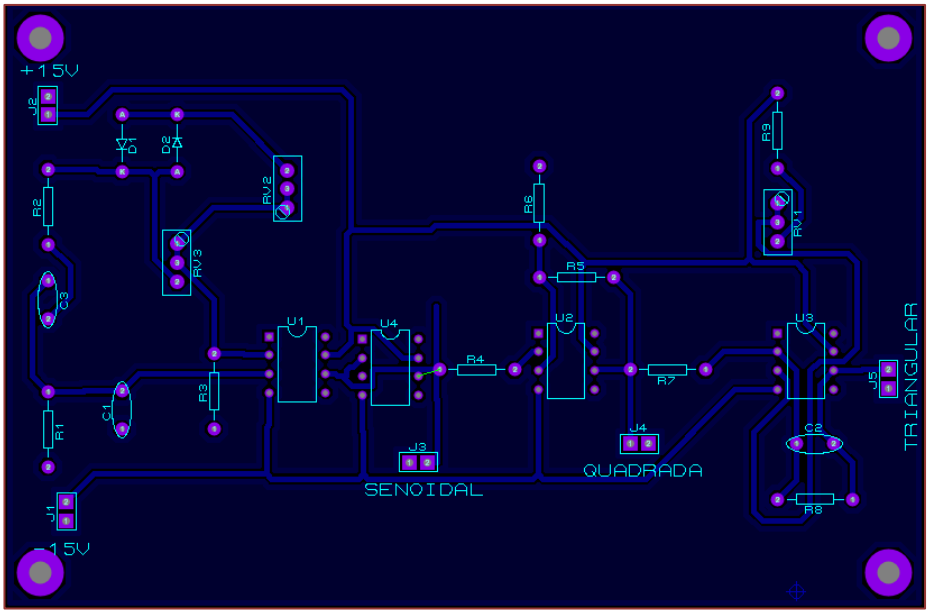
Outra vantagem do Protheus é a possibilidade de realizar a modelagem 3D da placa de circuito impresso. Com essa funcionalidade, é possível visualizar a placa em três dimensões, facilitando a identificação de possíveis problemas de layout, como interferências com outros componentes ou limitações de espaço. A modelagem 3D também pode ser útil para verificar a adequação da placa em relação ao gabinete ou ao sistema em que será incorporada.

Figura 13: Modelagem do circuito no Protheus



Fonte: Autoria Própria.

Figura 14: Layout da placa de circuito impresso no Protheus

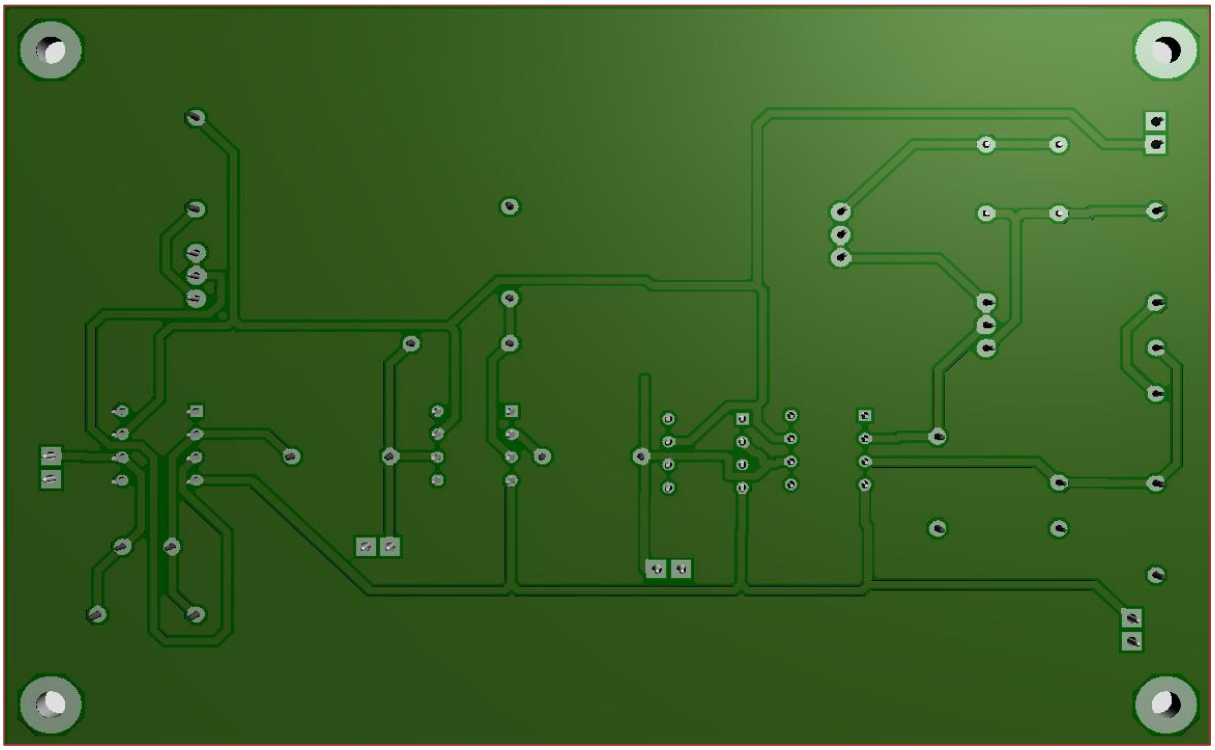


Fonte: Autoria Própria.

O plano terra, também conhecido como "ground plane", é amplamente utilizado em projetos de circuito impresso devido à sua importância na melhoria do desempenho e da confiabilidade do circuito. A função principal do plano terra é fornecer uma referência comum de tensão para todos os componentes do circuito.

Ao utilizar um plano terra, todas as conexões de terra dos componentes são direcionadas para uma área de cobre contínua na placa, que serve como uma trilha de retorno de corrente de baixa impedância. Isso minimiza as interferências eletromagnéticas, reduz o ruído e melhora a integridade do sinal.

Figura 15: Plano terra



Fonte: Autoria Própria.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conclusão do experimento foi obtida por meio da montagem e análise do circuito gerador de funções com amplificador operacional. O objetivo principal era utilizar os conceitos básicos dos amplificadores operacionais e sua aplicação em circuitos, além de construir um gerador de sinais de baixo custo.

Ao longo do experimento, foi possível verificar o funcionamento dos diferentes estágios do circuito, que são responsáveis pela geração das formas de onda senoidal, quadrada e triangular. O primeiro estágio consiste em um oscilador de relaxação modificado, que produz uma onda senoidal. Em seguida, essa onda senoidal é alimentada ao segundo estágio, que é um disparador Schmitt Trigger, responsável por gerar uma onda quadrada a partir da forma de onda senoidal de entrada. Por fim, o terceiro estágio utiliza um circuito integrador para transformar a onda quadrada em uma forma de onda triangular.

Durante a montagem do circuito, foram realizados ajustes e calibrações nos equipamentos, como a fonte de alimentação, o multímetro e o osciloscópio, garantindo assim a precisão das medições e o correto funcionamento do circuito.

Após a montagem e verificação do circuito, não foi possível observar o resultado esperado inicialmente, para resolver esse problema foi necessário utilizar acoplamentos, por meio do casamentos de impedâncias e buffer. Assim observou-se que teoria e prática apresentam disparidades, mas através dos da literatura possível solucionar o problema encontrado e alcançar os resultados esperados.

REFERÊNCIAS

[1] ALVES, Pedro. O que é um gerador de função e para que serve? Manual da Eletrônica, [s. l.], 2023. Disponível em: 1. Acesso em: 09 nov. 2023.

[2] Amplificador de Instrumentação - Embarcados. Disponível em: embarcados.com.br/amplificador-de-instrumentacao/. Acesso em: 07 nov. 2023.

[3] O Amplificador Operacional LM741 – Características e Aplicações. Disponível em: newtoncbraga.com.br/index.php/eletronica/54-artigos-diversos/1040-o-amplificador-operacional-lm741-caracteristicas-e-aplicacoes.html. Acesso em: 31 out. 2023.

[4] SCHMITT, Otto H. A thermionic trigger. Journal of Scientific Instruments, v. 15, n. 1, p. 24-26, 1938. DOI: [10.1088/0950-7671/15/1/308].

Capítulo 2

Projeto de modulação por largura de pulso (PWM) com amplificadores operacionais: protótipo e funcionamento

Giselle Francine Brito Muniz
Bruno Moura dos Santos Miranda
Edson Costa Oliveira
Ana Carolina Dias Brito
Filipe Carvalho de Andrade
Lukas Luan Florencio Pereira
Mikelly Bonfim Anjos
Jonas Souza Pinto
Joseane Oliveira da Silva

Resumo: Este estudo aborda a análise da literatura sobre modulação por largura de pulso (PWM) e a implementação prática de um protótipo utilizando amplificadores operacionais. O objetivo é comparar o sinal desejado com o sinal de entrada. Após a montagem do circuito e coleta de dados, foram identificadas inconsistências no projeto e comportamento dos sinais. O artigo destaca as principais questões na construção de um PWM, oferecendo possíveis soluções. Ademais, o presente trabalho proporciona considerações importantes no que tange aos desafios práticos associados ao PWM, contribuindo para futuras melhorias em projetos similares.

Palavras-chave: PWM, modulador, protótipo, amplificador-operacional.

1. INTRODUÇÃO

A modulação por largura de pulso, mais conhecida pela sigla em inglês PWM (Pulse Width Modulation), é um artifício utilizado em sistemas que demandam um controle de potência de um sinal pulsado. O PWM, além de ajustar a quantidade média de energia transmitida ao dispositivo durante um determinado período de tempo, oferece benefícios como controle de tensão, eficiência energética e compatibilidade com sistemas, sendo inclusive muito utilizada em sistemas de eletrônica de potência especialmente em sistemas de controle de velocidade de motores elétricos, controle de luminosidade em LEDs, conversores de energia, entre outros.

Gonzaga (2018) utilizou a técnica para emular o funcionamento de um Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) com o auxílio de um inversor. Futida e Romero (2008) utilizaram o recurso como controle de velocidade de robôs em competições de futebol de robôs. As aplicações destacam a versatilidade do circuito PWM, abrangendo áreas como emulação de sistemas complexos e controle preciso de dispositivos robóticos. Logo, a relevância de circuitos PWM eficientes é enfatizada, expandindo para inovações tecnológicas em diferentes campos.

Malvino (2016) aborda uma técnica para a geração do sinal PWM utilizando a integração de três circuitos comumente abordados nos livros de eletrônica: um oscilador de relaxação, um integrador e um comparador. Essa abordagem fornece uma base sólida para a projetos e implementação de circuitos PWM, permitindo a criação de sinais PWM precisos e controláveis, destacando ainda a importância do conhecimento prático e teórico na concepção de sistemas eletrônicos.

Portanto, o propósito deste estudo é concretizar a geração prática de um sinal PWM utilizando a técnica delineada por Malvino (2016). Além disso, serão abordados os desafios predominantes associados à execução de experimentos de experimentos práticos, juntamente com os métodos propostos para superar esses obstáculos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O PWM é uma variação dos pulsos de um sinal digital para controlar a quantidade média de energia entregue ao dispositivo. A fração que corresponde ao período que ocorrem os pulsos é chamada de taxa de ciclo de trabalho.

Matematicamente, conforme apresentado por Hart (2016), existem dois parâmetros necessários para determinar a taxa do ciclo de trabalho: o período e a largura do pulso propriamente dito, chamada de duty-cycle, definida em porcentagem, conforme a equação 01.

$$D = \frac{W}{T} \cdot 100 \qquad (1)$$

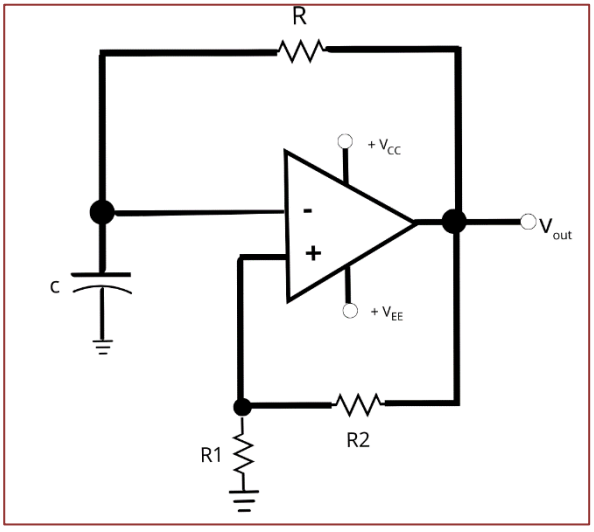
Sendo que D consiste na taxa de ciclo de trabalho, W a largura de pulso e T o período.

Na prática, uma das formas de se configurar o Modulador PWM é através da implementação de diferentes circuitos regulados. Na literatura existem três circuitos úteis para a confecção do PWM: o oscilador de relaxação, o integrador e o comparador (MALVINO, 2016). As próximas subseções estão dedicadas a explorar esses circuitos regulados.

2.1. OSCILADOR DE RELAXAÇÃO

O circuito denominado "oscilador de relaxação" é responsável por gerar um sinal periódico com uma frequência fixa, e é composto de um componente ativo, no caso em questão, um amplificador operacional (amp-op) e uma realimentação. O funcionamento do circuito em foco se dá através da comunicação do capacitor com o amplificador operacional, conforme visto na Figura 01.

Figura 01 - Circuito Oscilador de Relaxação



Fonte: Adaptado de (MALVINO, 2016).

Inicialmente, com o amp-op "desligado", o capacitor está descarregado com tensão próxima a zero. No instante seguinte, no momento de "ligação" do amp-op, uma corrente começa a fluir através do resistor conectado ao capacitor. Essa corrente faz com que o capacitor comece a carregar gradualmente. Conforme a carga do capacitor, a tensão nele aumenta até um determinado valor que aciona o amplificador, mudando assim seu estado.

Ao mudar de estado, o amplificador "desliga", direcionando o componente capacitivo a descarregar no resistor a ele conectado, diminuindo a tensão e retornando ao estado inicial e posteriormente reiniciando o ciclo.

A frequência do oscilador de relaxação é determinada pelos valores dos componentes, como a resistência e o capacitor, bem como pelas características do amplificador utilizado. Esses valores podem ser ajustados para obter a frequência desejada para o sinal PWM, conforme exposto nas Equações 2 e 3.

$$T = 2RC \cdot ln\left(1 + \frac{2 \cdot R1}{R2}\right) \qquad (2)$$

Sendo que R é a resistência, C é a capacitância e T é o período

$$f = \frac{1}{T} \qquad (3)$$

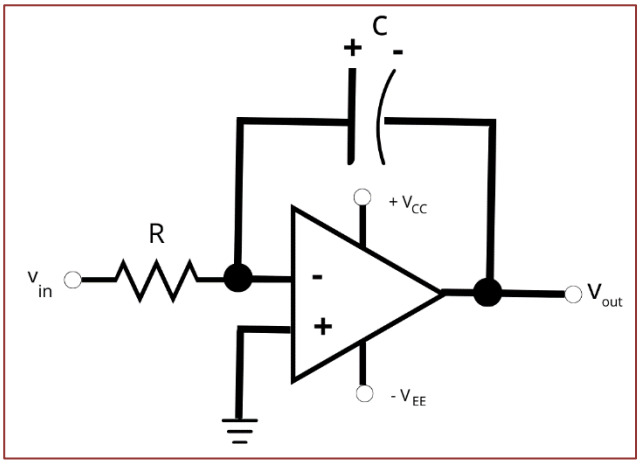
Sendo que f é a frequência.

É importante notar que a relação entre os tempos de carga e descarga do capacitor determina a relação entre os tempos de nível alto e nível baixo do sinal PWM. Alterando os valores dos componentes, é possível ajustar a relação de ciclo do sinal PWM, ou seja, a proporção entre o tempo em nível alto e o tempo em nível baixo. Isso afeta a largura do pulso do sinal PWM e, consequentemente, o controle da potência aplicada à carga.

2.2. INTEGRADOR

Esse circuito denominado "Integrador" é composto por um amplificador operacional (amp-op) e elementos de realimentação, como resistores e um capacitor, conforme ilustrado na Figura 02.

Figura 02 - Circuito Integrador



Fonte: Adaptado de (MALVINO, 2016).

O funcionamento do circuito integrador se baseia na integração do sinal de entrada. Inicialmente, o capacitor está descarregado, e o sinal de entrada é aplicado ao terminal negativo do amp-op. Conforme o sinal de entrada varia, a corrente flui através do resistor conectado ao capacitor, resultando em uma tensão proporcional à integral do sinal de entrada. Essa tensão integrada é fornecida ao terminal positivo do amp-op, que compara essa tensão com um valor de referência. Dependendo da relação entre a tensão integrada e o valor de referência, o amp-op gera um sinal PWM correspondente, como na Equação 04.

$$D = -\frac{1}{RC} \cdot \int Vin \cdot dt \qquad (4)$$

Sendo que D é a taxa de ciclo de trabalho e Vin é a tensão de entrada.

A relação entre os tempos de nível alto e nível baixo do sinal PWM é controlada pelo tempo necessário para o capacitor carregar e descarregar. Isso é determinado pelos valores dos componentes, como resistores e capacitores, no circuito integrador. Alterando esses valores, é possível ajustar a relação de ciclo do sinal PWM, ou seja, a proporção entre o tempo em nível alto e o tempo em nível baixo. Essa capacidade de ajustar a relação de ciclo do sinal PWM é especialmente útil em aplicações de controle de

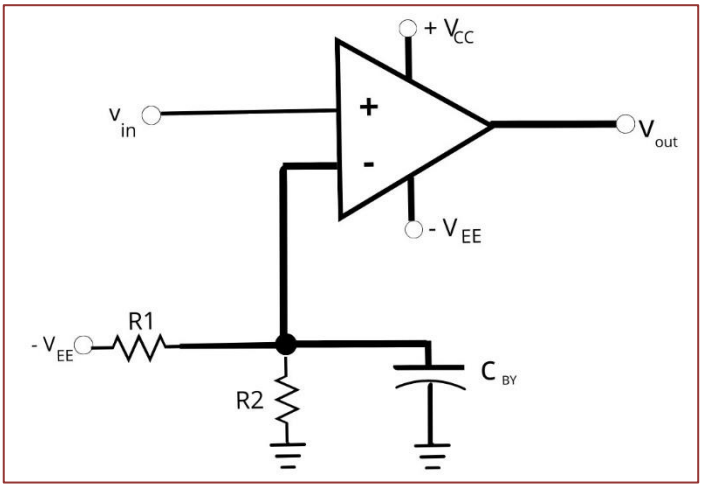
potência, onde a largura do pulso determina a quantidade de energia entregue à carga. Com o circuito integrador no PWM, é possível obter um controle preciso da potência, ajustando os componentes de acordo com as necessidades específicas da aplicação.

2.3. COMPARADOR

O comparador é um circuito que compara duas tensões de entrada e gera um sinal de saída com base nessa comparação. Para o funcionamento do comparador no PWM, indica-se a tensão de referência de acordo a controlar a largura do pulso do modulador.

Como citado anteriormente, o comparador compara duas tensões de entrada, portanto, se a tensão advinda do oscilador de relaxação for maior do que a tensão de referência, o comparador gera um sinal de saída em nível alto. Caso contrário, o comparador gera um sinal de saída em nível baixo. Desse modo, o sinal de saída do comparador é utilizado para controlar o circuito PWM. O circuito do comparador pode ser visto na Figura 03.

Figura 03 - Circuito Comparador



Fonte: Adaptado de (MALVINO, 2016).

O elemento de controle, o amplificador-operacional, é responsável por ligar e desligar a carga em alta velocidade, em uma frequência muito maior do que a frequência do oscilador de relaxação. Quando o sinal de saída do comparador está em nível alto, o elemento de controle liga a carga. Isso permite que a corrente flua para a carga durante um determinado período de tempo, dependendo da largura do pulso do sinal PWM.

Quando o sinal de saída do comparador está em nível baixo, o elemento de controle desliga a carga. Nesse estado, a corrente é interrompida e a carga não recebe energia. O processo de comparação, geração do sinal de saída e controle do elemento de controle se repete continuamente em alta velocidade, resultando em uma forma de onda PWM com largura de pulso variável.

3. METODOLOGIA

A metodologia para este projeto foi dividida em 5 etapas: (I) Dimensionamento

teórico do projeto, (II) Simulação, (III) Construção da placa e do plano de terra, (IV) Validação do projeto e (V) Análise dos resultados. Os principais métodos estudados e abordados nas primeiras quatro etapas serão discutidos nessa seção, enquanto a análise de resultados será abordada na próxima seção.

3.1. DIMENSIONAMENTO TEÓRICO DO PROTÓTIPO

O protótipo levantado é formado pelo acoplamento de três circuitos em série: circuito oscilador de relaxação, circuito integrador e circuito comparador. Os valores dos materiais do protótipo foram calculados de acordo com as equações tal tal tal e podem ser visualizadas na Tabela 01.

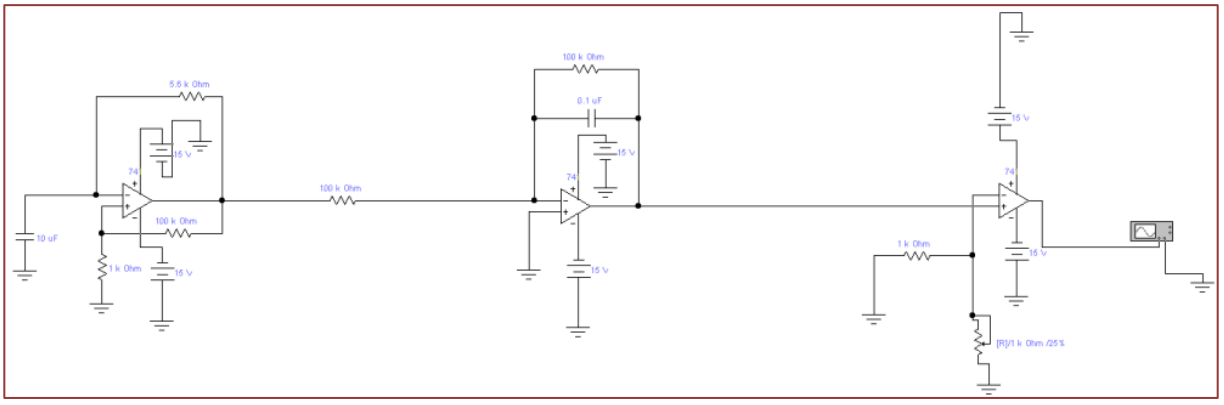
Tabela 01 - Componentes utilizadas para a realização do projeto

Circuito Oscilador de Relaxação	Circuito Integrador	Circuito Comparador
• 01 Capacitor de 0,1ηF • 01 Resistor de 1KΩ • 01 Resistor de 2KΩ • 01 Resistor de 18KΩ • 01 Amplificador operacional LM741C	• 01 Capacitor de 10ηF • 01 Resistor de 1KΩ • 01 Resistor de 10KΩ • 01 Amplificador operacional LM741C	• 01 Resistor de 10KΩ • 01 Potenciômetro de 1KΩ • 01 Amplificador operacional LM741C

Fonte: Autoria própria.

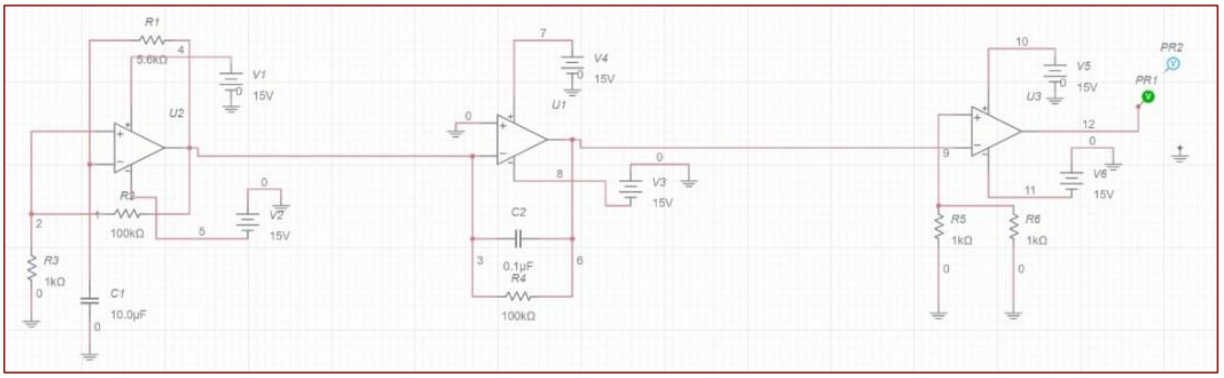
O trabalho foi projetado em dois softwares de design eletrônicos, o *Electronics Workbench* (EWB) e o *Multisim*, de modo a validar a simulação correta do modulador. As Figuras 04 e 05 ilustram os circuitos montados nas duas plataformas escolhidas.

Figura 04 - Circuito PWM simulado no EWB



Fonte: Autoria própria.

Figura 05 - Circuito PWM simulado no *Multisim*

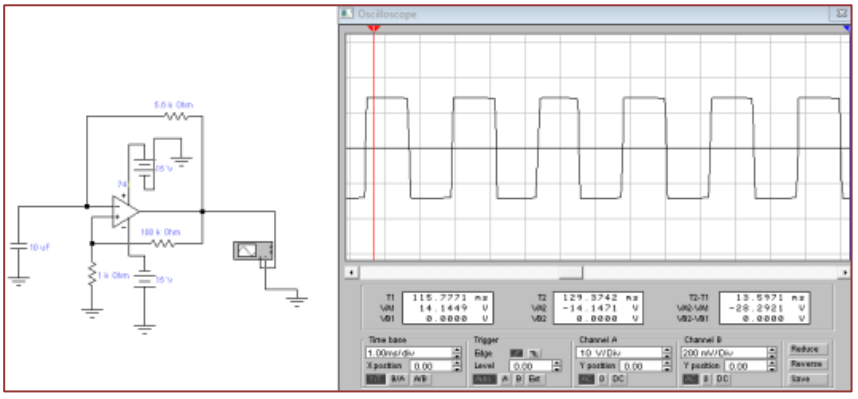


Fonte: Autoria própria.

3.2. SIMULAÇÃO

Para melhorar a compreensão do PWM, ainda no *EWB*, realizou-se a simulação de saída de sinal de cada circuito componente do modulador. Inicialmente, trabalhou-se com o oscilador de relaxação cuja tensão de entrada é dada pela tensão de offset e a saída é uma onda quadrada. A Figura 06 exibe o sinal de saída do oscilador de relaxação simulado.

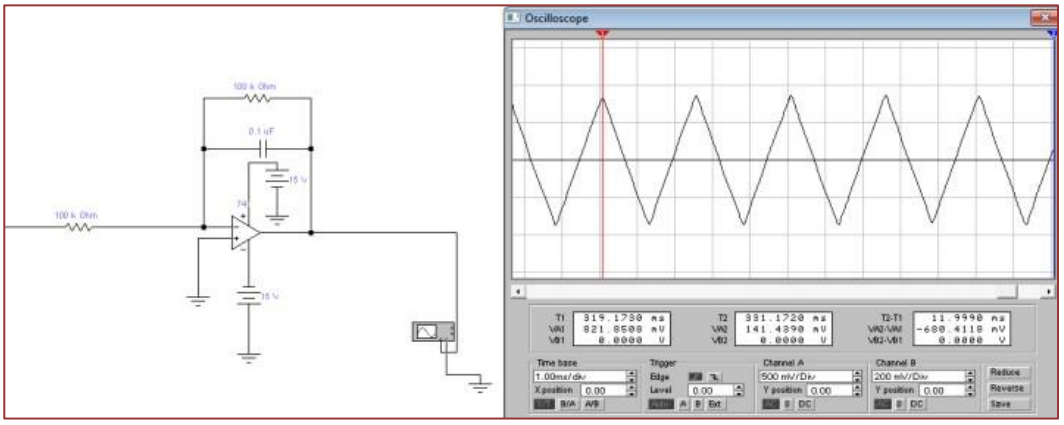
Figura 06 - Saída do oscilador de relaxação(*EWB*).



Fonte: Autoria própria.

Em seguida, simulou-se o sinal de saída do integrador, cuja saída é uma onda triangular, que utiliza o sinal do oscilador de relaxação como tensão de entrada. A Figura 07 representa o sinal de saída do integrador.

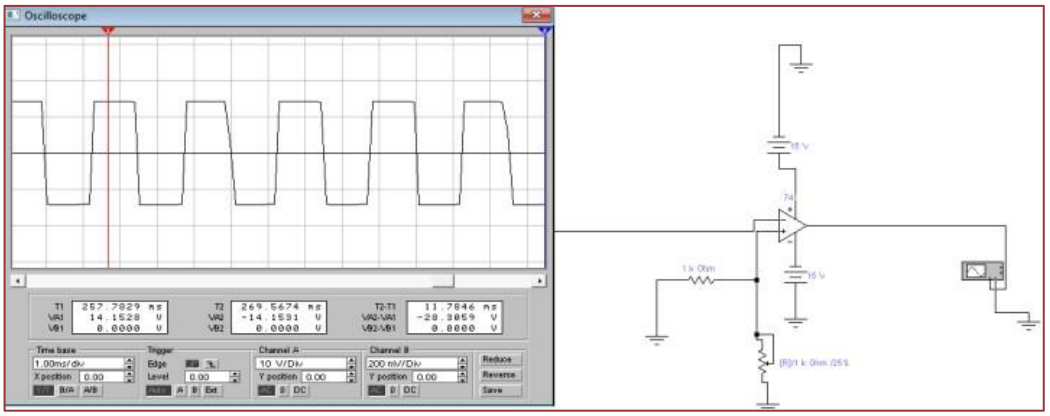
Figura 07 - Saída do integrador (*EWB*)



Fonte: Autoria própria

Por fim, simulou-se o sinal de saída do comparador, que é o sinal modulador do circuito PWM. A Figura 08 representa o sinal de saída do circuito.

Figura 08 - Saída do PWM (*EWB*)

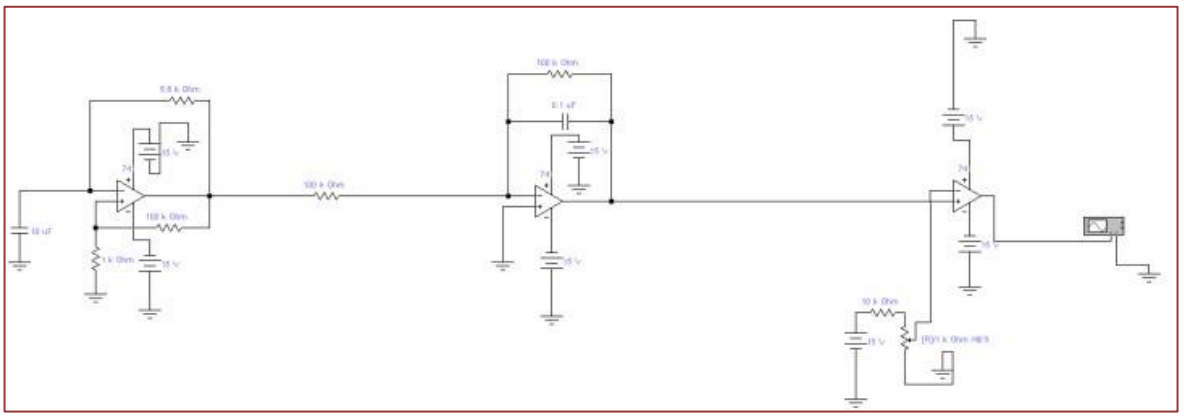


Fonte: Autoria própria.

Observou-se, através da teoria de divisor de tensão, que a entrada não-inversora do amplificador operacional no circuito comparador estava dividindo uma tensão de 0V visto que tanto o resistor quanto o potenciômetro estavam aterrados. Tal problema impossibilitou a modulação de sinal de saída do PWM.

Para que o problema fosse resolvido, alimentou-se o divisor de tensão com uma fonte contínua de 15V e substituiu-se o resistor de 1kΩ por um de 10kΩ. Além disso, configurou-se o potenciômetro em 40%, tornando assim possível a modulação do sinal, tanto na simulação quanto no protoboard. A Figura 09 representa a simulação corrigida.

Figura 09 - Simulação final do PWM

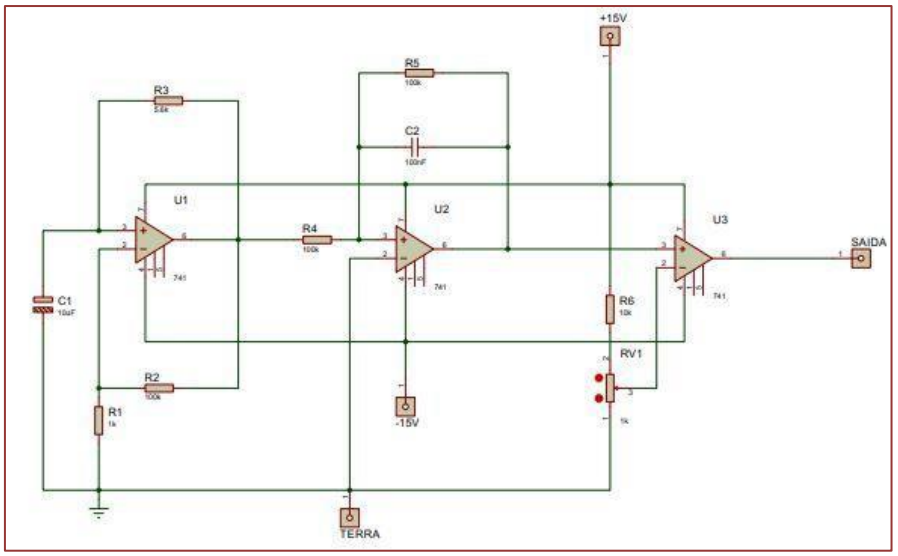


Fonte: Autoria própria.

3.3. CONSTRUÇÃO DA PLACA E DO PLANO DE TERRA

Com o objetivo de reduzir os erros causados pelo mau contato entre a protoboard e os jumpers, uma placa de circuito impresso foi montada. Esse procedimento foi realizado com o auxílio do software *Proteus*. A Figura 10 ilustra o circuito montado.

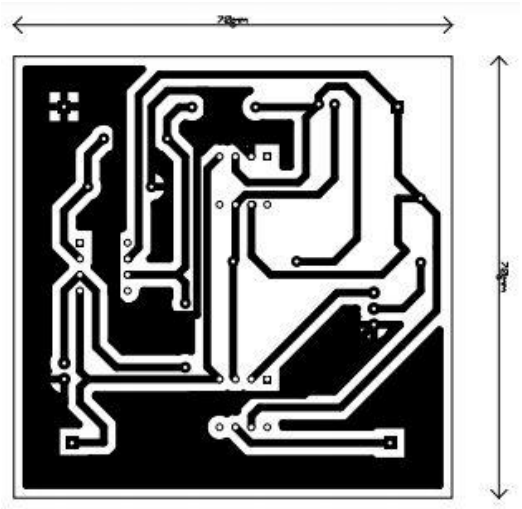
Figura 10- Simulação final do PWM para implementação em placa



Fonte: Autoria própria.

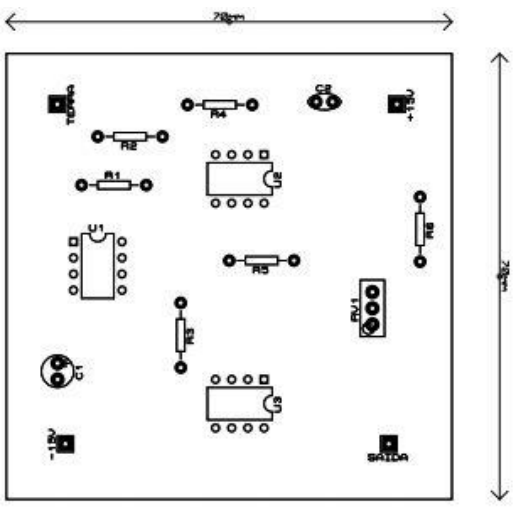
Além disso, as representações esquemáticas do circuito destinadas à implementação na placa simulada são minuciosamente detalhadas nas Figuras 11, 12, 13 e 14. Essas ilustrações proporcionam uma visualização gráfica e abrangente da disposição dos componentes e conexões no contexto da simulação.

Figura 11- Porção superior



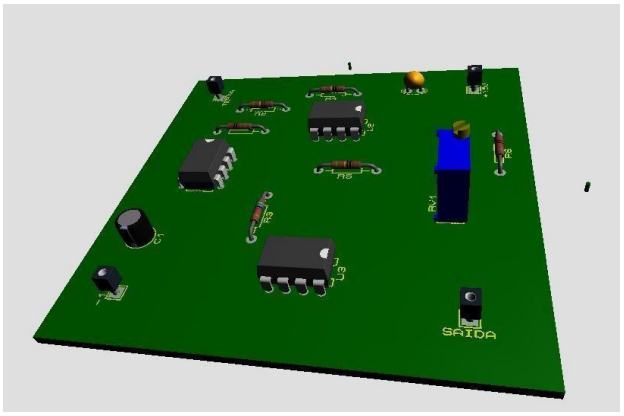
Fonte: Autoria própria.

Figura 12- Porção inferior



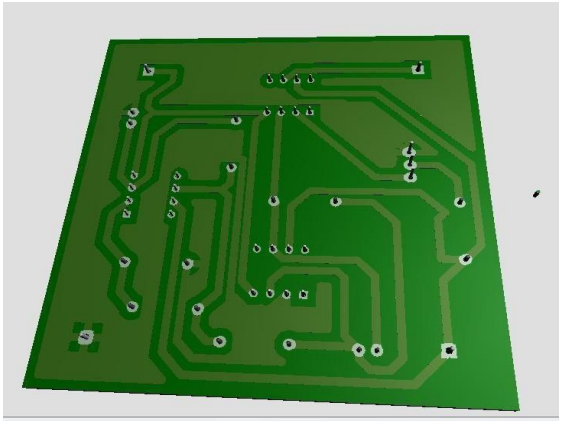
Fonte: Autoria própria.

Figura 13: Porção superior em 3D



Fonte: Autoria própria.

Figura 14: Porção inferior em 3D



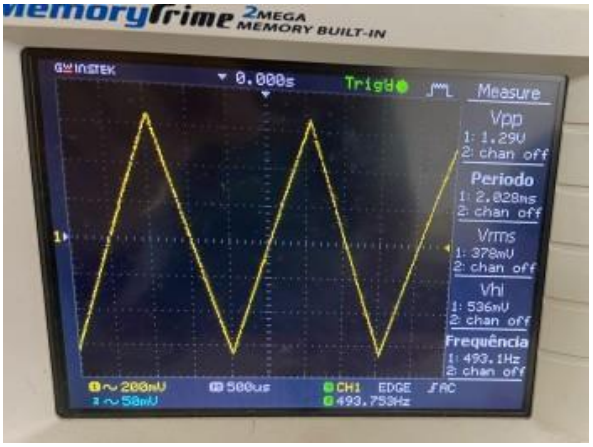
Fonte: Autoria própria.

Este processo de simulação e representação visual não apenas fortalece a compreensão do rearranjo do circuito em um ambiente prático, mas também destaca a importância da plataforma *Proteus* como ferramenta eficaz na concepção e análise de circuitos eletrônicos. Essas simulações constituem um passo crucial na validação e refinamento do projeto antes da implementação física, contribuindo para a confiabilidade e eficácia do sistema projetado.

3.4. VALIDAÇÃO DO PROJETO

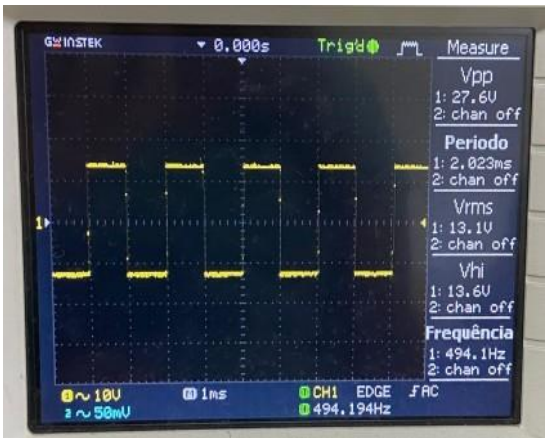
A validação do projeto foi feita por meio de um osciloscópio e um gerador de sinal. Os amplificadores do circuito foram alimentados com +15V e -15V. As Figuras 15 e 16 ilustram as saídas dos circuitos integrador e comparador, condizente com os gráficos apresentados na simulação na subseção B.

Figura 15: Saída do integrador



Fonte: Autoria própria.

Figura 16: Saída do Comparador



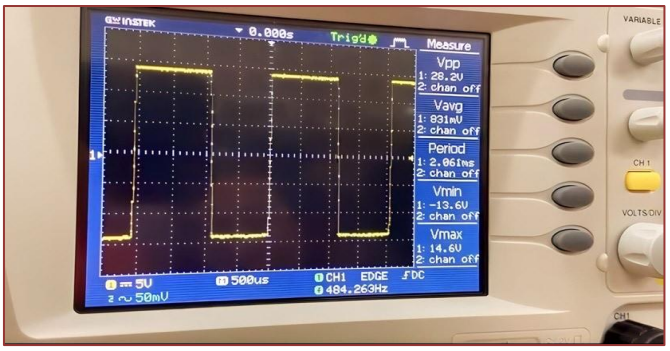
Fonte: Autoria própria.

Os valores de ciclos de trabalho PWM escolhidos para validar o circuito montado foram de 50% e 75%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, os resultados obtidos por meio da metodologia aplicada serão apresentados. A Figura 17 ilustra o resultado obtido para o ciclo de trabalho em 50%. O resultado obtido é considerado satisfatório uma vez que o período de cada onda em nível alto se aproxima visualmente do período em que a onda permanece em nível baixo.

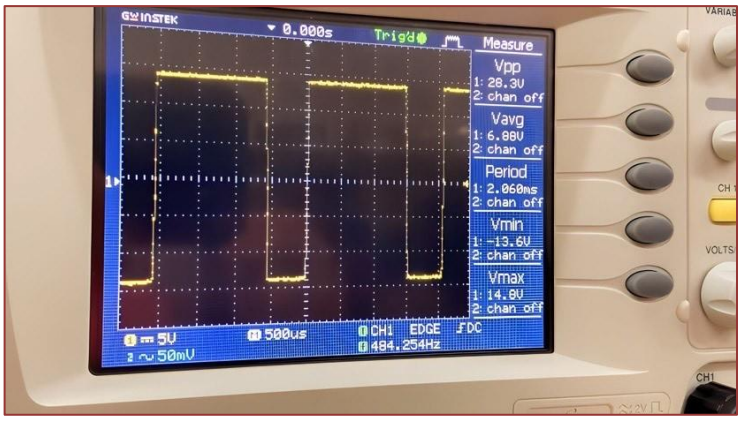
Figura 17 - PWM com ciclo de trabalho em 50%



Fonte: Autoria própria.

A Figura 18 ilustra o ciclo de trabalho obtido em 75%. Conforme visto visualmente, o resultado pode ser considerado novamente satisfatório uma vez que o período em nível alto equivale a três vezes mais que o período em nível baixo.

Figura 18 - PWM com ciclo de trabalho em 50%



Fonte: Autoria própria.

Esses resultados indicam que o circuito montado funcionou adequadamente, com dados confiáveis e eficientes. O potenciômetro no circuito comparador, configurado para operar em 40%, possibilitou a modulação do sinal. Essa configuração permitiu um ajuste mais adequado à resistência do potenciômetro e, consequentemente, controlar a proporção do sinal PWM gerado. Com a capacidade de modular o sinal, tanto na simulação quanto no protoboard, tornou-se possível obter diferentes níveis de potência ou realizar tarefas específicas, como controle de velocidade de motores ou ajuste de luminosidade em sistemas de iluminação. A combinação do resistor de 10kΩ no divisor de tensão e a configuração adequada do potenciômetro proporcionaram uma solução eficiente para o projeto de PWM, permitindo um controle preciso e flexível do sinal.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou uma revisão de literatura de moduladores por largura de pulso, e um protótipo de um modulador PWM com amplificadores operacionais. Durante a configuração do PWM, implementou-se os circuitos oscilador de relaxação, integrador e comparador. Durante a configuração do modulador, a implementação de circuitos estudados, como o oscilador de relaxação, integrador e comparador, foi necessária. Inicialmente, ao montar o circuito na protoboard, os resultados não atenderam às expectativas.

A substituição do resistor de 1kΩ por um de 10kΩ, para melhorar a resolução do divisor de tensão, pode impactar o restante do circuito. Um resistor de valor tão alto pode resultar em correntes extremamente baixas, causando problemas de estabilidade e sensibilidade a ruídos.

Dessa maneira, com a montagem definitiva, com as devidas correções, proporcionou um resultado mais alinhado com a teoria esperada das simulações, ou seja, um menor erro percentual. Nas simulações, a variação das larguras dos pulsos da onda quadrada

para dois diferentes valores de ciclo de trabalho (50%, 75%) foi demonstrada. Assim, o experimento demonstrou a validação dos conceitos teóricos e ofereceu uma compreensão prática das aplicações dos amplificadores operacionais.

Uma sugestão para aprimorar o projeto seria uma análise mais detalhada da faixa de valores esperada para a divisão de tensão, considerando as características do circuito e a sensibilidade desejada. Isso permitiria escolher um valor de resistor que ofereça boa resolução sem comprometer a estabilidade e robustez do sistema.

Assim, apesar das melhorias no projeto de PWM, é crucial considerar cuidadosamente os valores dos componentes, levando em conta estabilidade, sensibilidade e robustez do sistema. Recomenda-se realizar testes adicionais para determinar os valores ideais dos componentes, visando um controle preciso e eficiente do sinal PWM.

REFERÊNCIAS

[1] HART, Daniel W. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos**. McGraw Hill Brasil, 2016.

[2] MALVINO, Albert Paul. Eletrônica - Vol. 2. 7ª edição. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

[3] GONZAGA, Arthur Simões. Estudo de técnica de modulação por largura de pulso (PWM) aplicado a inversores trifásicos. 2018.

[4] FUTIDA, Ivo Takao; ROMERO, Roseli Aparecida Francelin. **Desenvolvimento mecânico e de Controle PWM para sistema robótico.** 2008.

Capítulo 3

Amplificadores operacionais em aplicações de medição de tensão: projeto de um voltímetro

Estefani Maria Barreto Montenegro
Jonas Souza Pinto
Cláudio Júnior Neves Sousa
Jornando Prado de Oliveira Santos
Anderson de Oliveira Castro Correia
Joseane Oliveira da Silva
Anna Maria de Medeiros Gomes Oliveira
Bruno Moura dos Santos Miranda

Resumo: O relatório descreve um projeto experimental e laboratorial de construção de um voltímetro realizado como parte da disciplina de Eletrônica. Foram estudados os princípios dos conversores de dados: Conversor Digital-Analógico (DAC) e Analógico-Digital (ADC). Em seguida, um circuito foi projetado e montado para medir a tensão de uma determinada fonte de alimentação, utilizando os CI´s : Flip-flop, o conversor digital-analógico (DAC) com amp-op e o circuito integrado 555. Os resultados obtidos demonstraram que as simulações do circuito foram condizentes com o encontrado na literatura adotada, por outro lado, devido a queima dos dispositivos na placa de fenolite coberta durante a soldagem dos circuitos integrados, o protótipo apresentou falhas na operação. Em suma, o projeto experimental proporcionou uma compreensão prática dos conceitos dos conversores de dados e sua aplicação no sistema do voltímetro.

Palavras-chave: Voltímetro, conversor digital-analógico (DAC), conversor analógico-digital (ADC).

1. INTRODUÇÃO

O estudo de amplificadores operacionais e na aplicação de voltímetros desempenham um papel significativo na engenharia eletrônica, sendo essenciais para a medição e controle de grandezas elétricas. De acordo com Idoeta, amplificadores operacionais são dispositivos de amplificação e processamento de sinais amplamente empregados em diversas aplicações, abrangendo desde circuitos de áudio até sistemas de instrumentação de alta precisão. Por sua vez, os voltímetros são instrumentos de medição fundamentais para quantificar tensões elétricas em sistemas eletrônicos e de potência (Idoeta, 2003).

Este relatório tem como objetivo apresentar a importância do estudo de amplificadores operacionais e destacar o papel crucial dos voltímetros na engenharia eletrônica, conforme afirmado (Idoeta, 2003). Dessa forma, como o objetivo principal de aplicar os conceitos e teorias apresentados na disciplina de Eletrônica no curso de Engenharia Elétrica por meio do desenvolvimento de um protótipo de voltímetro. Especificamente, busca-se explorar o uso de amplificadores operacionais como elementos-chave para a construção desse dispositivo de medição de tensão. Além disso, do desenvolvimento de um protótipo de voltímetro, utiliza-se amplificadores operacionais analógicos como base, visando fornecer uma precisa medição de tensões elétricas. Através desse projeto, busca-se aprimorar o conhecimento teórico sobre amplificadores operacionais e adquirir habilidades práticas na aplicação desses dispositivos na construção de instrumentos de medição.

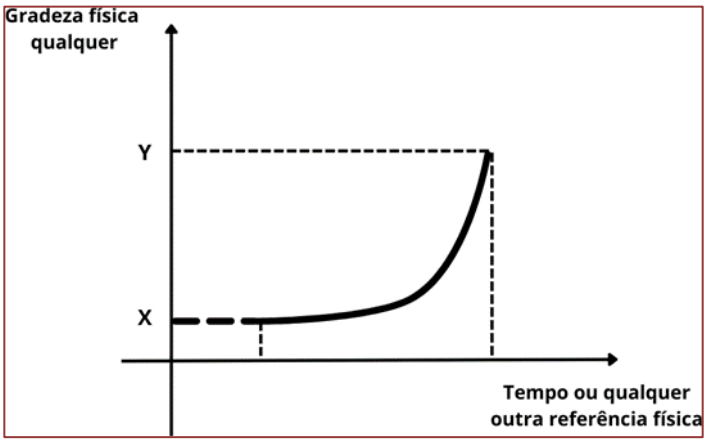
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os conversores de dados desempenham um papel fundamental no processamento de sinais, permitindo a conversão entre sinais analógicos e amostras digitais, estabelecendo uma conexão crucial entre o mundo físico e o computacional. Esta seção abordará o conversor Digital-Analógico (DAC) e Analógico-Digital (ADC) com base em teorias relevantes no campo da eletrônica de sinais para projetar o circuito de um medidor de tensão.

Um sinal analógico é caracterizado por uma variação contínua de uma grandeza física ao longo do tempo, por exemplo, grandezas como velocidade, pressão, temperatura, corrente elétrica, tensão e resistência podem ser representadas de maneira analógica, isto é, para se atingir um valor desejado de uma grandeza qualquer, é necessário que esta passe por todos os valores intermediários de forma contínua.

Qualquer variação existente pode ser observada através de um gráfico, onde se relacionam a grandeza que varia, o tempo ou outra referência física. O gráfico da Figura 1, mostra a título de exemplo, uma variação contínua ou analógica genérica.

Figura 1: Uma variação contínua ou analógica genérica



Fonte: Adaptação do Idoeta (2023).

2.1. CONVERSOR D/A

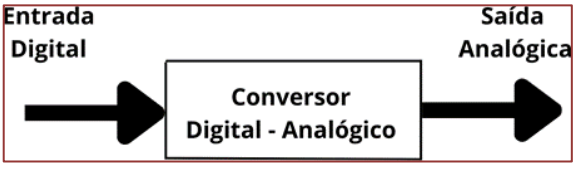
O conversor digital-analógico (DAC), também conhecido como conversor D/A, possui a função principal de representar uma forma de onda em sua saída, convertendo um sinal processado no domínio digital para o domínio analógico. A resolução de bits na entrada do DAC é adequada para realizar essa tarefa com precisão (Boylestad, 2004).

No entanto, em sistemas digitais, a informação é manipulada e armazenada em formato discreto, representado por dígitos binários (bits). Portanto, para processar sinais analógicos em sistemas digitais, é necessário converter esses sinais em formato digital. É aí que entram os conversores ADC. Um conversor Analógico-Digital (ADC) é um dispositivo eletrônico que converte um sinal analógico em uma representação digital correspondente.

2.2. FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR D/A

O conversor D/A pode ser representado pelo diagrama de bloco apresentado na Figura 2. Pela própria denominação do conversor, tem-se uma informação de entrada digital e uma saída analógica em tensão ou corrente.

Figura 2: Esquema Funcional do Conversor D/A



Fonte: Adaptação do Idoeta (2023).

O número de bits da informação digital de entrada indica a resolução do conversor D/A. Quanto maior o número de bits da palavra de entrada, maior será o número de níveis analógicos diferentes que a estrutura é capaz de converter. Deve-se ter em mente que para

cada palavra digital, o conversor fornece um nível analógico específico e distinto dos demais níveis. Portanto, quanto maior o número de bits de entrada, mais refinado será o processo de conversão.

A saída analógica é ponderada pela grandeza da entrada digital. Esta ponderação é idealmente expressa pela equação 1.

$$S_A = \left(\frac{b_n}{2} + \frac{b_{n-1}}{2^2} + \frac{b_{n-2}}{2^3} + \ldots + \frac{b_2}{2^{n-1}} + \frac{b_1}{2^n}\right) \cdot k \qquad [1]$$

Onde:

S_A = Saída Analógica (Valor de tensão ou corrente);

(b_n, b_{n-1}, b_{n-2}...) = Entrada Digital;

k = Grandeza física de referência;

n = Número de bits.

2.3. CONVERSOR A/D

Na seção anterior, foi tratada a questão da conversão digital-analógica, contudo também se faz necessária a realização da conversão inversa, isto é, a conversão analógico-digital.

Um conversor Analógico-Digital (ADC) é um dispositivo eletrônico que converte um sinal analógico em uma representação digital correspondente. Essa conversão ocorre em duas etapas principais: Amostragem e quantização. A amostragem envolve a captura de valores do sinal analógico em momentos discretos no tempo. Em seguida, a quantização atribui um valor numérico digital a cada amostra, aproximando a amplitude do sinal analógico ao valor digital mais próximo. O resultado é uma sequência de números digitais que representa o sinal analógico original.

2.4. FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR A/D

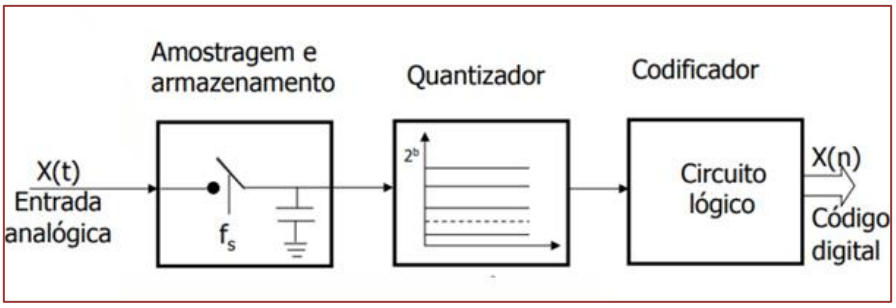
O processo de conversão analógico-digital baseia-se, fundamentalmente, em inserir a informação em formato analógico e obter na saída a mesma informação em formato digital, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Esquema Funcional do Conversor A/D

Fonte: Adaptação do Idoeta (2023).

O funcionamento de um Conversor A/D envolve várias etapas, como mostra a Figura 4.

Figura 4: Funcionamento do Conversor A/D



Fonte: Adaptação do Idoeta (2023).

- **Amostragem:** O sinal analógico de entrada é mostrado em intervalos regulares de tempo. Isso significa que o sinal é medido e registrado em momentos específicos, geralmente usando um dispositivo chamado amostrador.
- **Quantização:** Cada amostra do sinal analógico é convertida em um valor digital. Essa etapa envolve a atribuição de um número digital a cada amostra, representando a amplitude do sinal analógico naquele momento. A quantização geralmente é feita dividindo-se a amplitude do sinal em um determinado número de níveis discretos.
- **Codificação:** Os valores digitais obtidos na etapa de quantização são codificados em formato binário. Isso significa que cada valor é representado por uma sequência de bits (zeros e uns). A quantidade de bits usada para representar cada amostra determina a resolução do conversor A/D.

Essas etapas são realizadas internamente dentro do conversor A/D, geralmente por meio de circuitos eletrônicos especializados. A qualidade e a precisão do conversor A/D são influenciadas por fatores como a taxa de amostragem, a resolução e a precisão dos componentes utilizados.

Após a conversão analógico-digital, os dados digitais podem ser processados por dispositivos e algoritmos digitais, permitindo uma ampla gama de aplicações, exemplo o protótipo do Voltímetro.

3. DIMENSIONAMENTO TEÓRICO DO PROTÓTIPO

Durante o desenvolvimento do projeto de voltímetro, foi possível aprofundar-se em vários componentes eletrônicos essenciais: o *flip-flop*, o conversor digital-analógico (DAC) com amp-op e o circuito integrado 555. Adiante será explorado em detalhes o funcionamento e a importância de cada um desses componentes.

3.1. *FLIP-FLOP*

O *flip-flop* é um tipo de circuito digital utilizado para armazenar e transmitir informações. Ele é crucial em aplicações que requerem memória, como circuitos sequenciais e contadores. O *flip-flop* D é um dos tipos mais comuns e possui uma entrada de dados (D) e duas saídas (Q e Q).

No projeto do voltímetro, foi utilizado o *flip-flop* para armazenar o valor medido da tensão e transmiti-lo para exibição no *display*. O estado atual do *flip-flop* é atualizado na borda de subida do sinal de *clock*. A entrada D é conectada ao circuito de amostragem da tensão medida, e a saída Q fornece o valor armazenado.

É importante levar em consideração o tempo de propagação do *flip-flop*, que é o tempo necessário para a saída se estabilizar após uma mudança na entrada. Além disso, os tempos de *setup* e *hold* devem ser respeitados para garantir uma amostragem adequada da tensão medida. Essas características do *flip-flop* são essenciais para a precisão e confiabilidade do voltímetro.

3.2. DAC COM REDE R2R

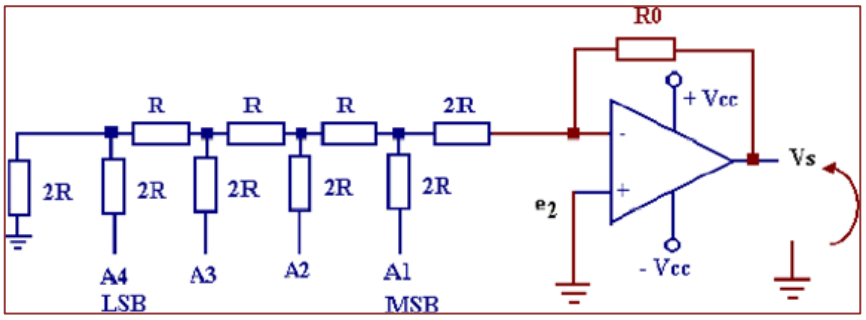
O DAC com rede R2R é baseado em uma rede de resistores com valores específicos, que segue o padrão de proporções R e 2R, como mostra a Figura 5. Essa configuração utiliza amplificadores operacionais para realizar a soma das correntes proporcionais aos bits digitais e converter essas correntes em uma tensão analógica.

A rede R2R consiste em uma série de resistores conectados em duas configurações: resistores de valor R e resistores de valor 2R. Cada resistor está associado a um bit digital. Por exemplo, se estivermos usando um DAC de 8 bits, teremos 8 resistores na rede. Os resistores R e 2R são escolhidos de forma que a proporção entre eles seja mantida. Por exemplo, se o resistor de valor R for de 1kΩ, o resistor de valor 2R será de 2kΩ. Essa proporção é fundamental para garantir a precisão na conversão. Os bits digitais são aplicados à entrada dos resistores da rede. Quando um bit está em nível lógico alto (1), a corrente flui através do resistor conectado a esse bit. Quando um bit está em nível lógico baixo (0), não há corrente fluindo pelo resistor associado.

Os amplificadores operacionais são utilizados para somar as correntes provenientes dos resistores. Cada corrente é amplificada pelo amp-op e somada às outras correntes. O resultado é uma corrente total que é convertida em uma tensão de saída proporcional ao valor digital aplicado aos bits.

É importante notar que a tensão de saída do DAC é influenciada pela corrente de referência aplicada à rede R2R. Essa corrente de referência é determinada pelo projeto e deve ser escolhida de acordo com a faixa de tensão desejada na saída do DAC. Para calcular a tensão de saída do DAC com rede R2R utilizando ampop, é necessário levar em consideração os valores dos resistores R e 2R, a corrente de referência e a relação entre as correntes e os bits digitais.

Figura 5: Circuito D/A com rede R2R



Fonte: Adaptação do Endigital (2023).

3.3. CIRCUITO INTEGRADO 555

O circuito integrado 555 é um componente extremamente versátil que pode ser configurado de várias maneiras, como oscilador, temporizador ou gerador de pulsos. Ele desempenha um papel fundamental no projeto do voltímetro, fornecendo o sinal de *clock* necessário para a medição e exibição da tensão. O 555 possui oito pinos, sendo os mais relevantes para o projeto: VCC (alimentação positiva), GND (terra), TRIGGER (gatilho), THRESHOLD (limiar), OUT (saída) e RESET (reset), a Figura 7 retrata um exemplo desse componente.

A configuração do circuito é determinada pela conexão desses pinos com componentes externos, como resistores e capacitores. Por exemplo, ao configurar o 555 como oscilador astável, pode gerar uma forma de onda quadrada contínua. A frequência dessa forma de onda é determinada pelos valores dos resistores e capacitores conectados ao circuito. É possível calcular a frequência utilizando a equação 2:

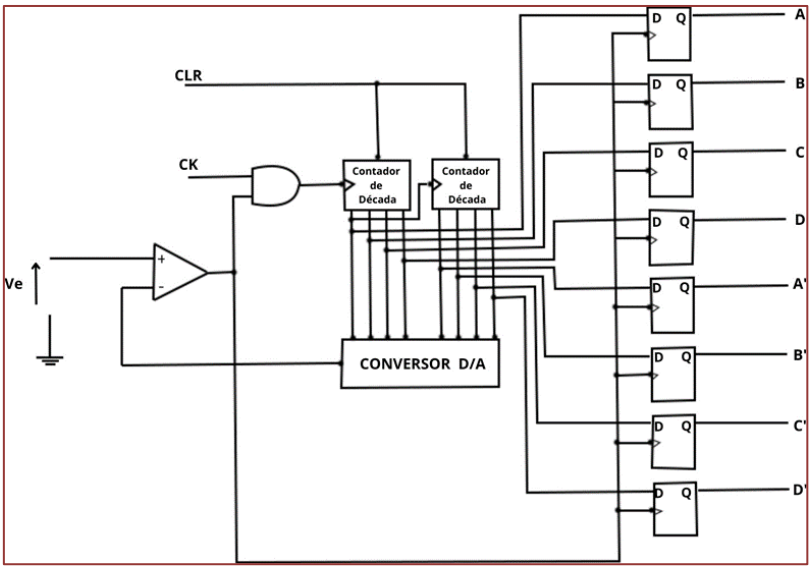
$$f = \frac{1{,}44}{((R1 + (2 \cdot R2)) \cdot C)} \qquad [2]$$

O circuito integrado 555 desempenha um papel crucial na temporização do voltímetro, permitindo a geração do sinal de *clock* necessário para a medição e exibição da tensão.

3.4. ESQUEMÁTICO DO VOLTÍMETRO

Nesta seção, será apresentado o esquemático e o funcionamento de um protótipo de voltímetro que utiliza um contador de década, *flip-flop* e um conversor digital-analógico (D/A), como mostrado na Figura 6.

Figura 6: Esquema Funcional do Voltímetro



Fonte: Adaptação do Idoeta (2023).

4. PROJETO

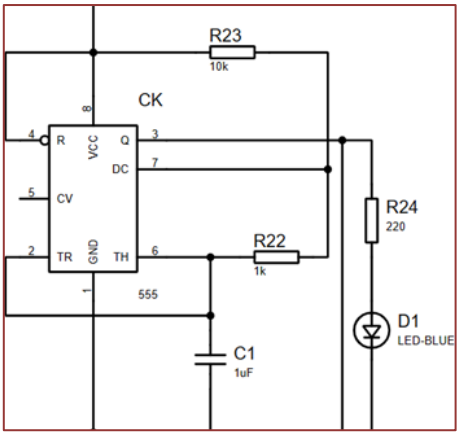
Esta seção dedica-se a relatar como o projeto do voltímetro foi desenvolvido, aplicando os conhecimentos ministrados pelo professor em sala de aula. Também foi necessário fazer consultas aos datasheets dos CI's utilizados. O projeto é composto por várias partes que desempenham funções diferentes, mas totalmente dependentes do todo.

A primeira parte a ser projetada foi o gerador de *clock* (CK). Para isso foi montado o circuito da Figura 7. O valor de frequência desejado foi o de 60Hz, já que essa é a frequência fornecida pela concessionária de energia. Os valores dos resistores e do capacitor foram calculados pela Equação 2. O LED presente na Figura 7, serve somente para indicar que o gerador está funcionando.

A saída do *CK* entra em uma porta lógica *AND*, que vai fazer uma comparação lógica desse sinal, com o sinal que sai do comparador. A sua saída será conectada ao contador de dec 1, que será responsável pelo valor decimal.

O contador de dec 1 vai fazer o chaveamento através das saídas Q0, Q1, Q2 e Q3, para o conversor digital-analogico 1. Essas saídas também estarão derivadas para o *flip-flop* 1. O flip-flop 1 será responsável por armazenar os valores de tensão e gerar o código binário que vai entrar no conversor de 7 segmentos. Esse por sua vez vai comandar o *display* de 7 segmentos.

Figura 7: Gerador de *clock* (CK), com CI555



Fonte: Autoria própria (2023).

Esse *display* mostrará o valor decimal. A saída de Q0 e Q3 do contador de dec 1 vai está ligada à porta *AND* 2, que vai ter saída de nível lógico alto quando suas entradas tiverem nível lógico alto. Esse sinal vai implementar o contador de dec 2. A Partir daí será igual ao circuito depois do contador de dec 1. Essa parte é responsável pelo valor da unidade.

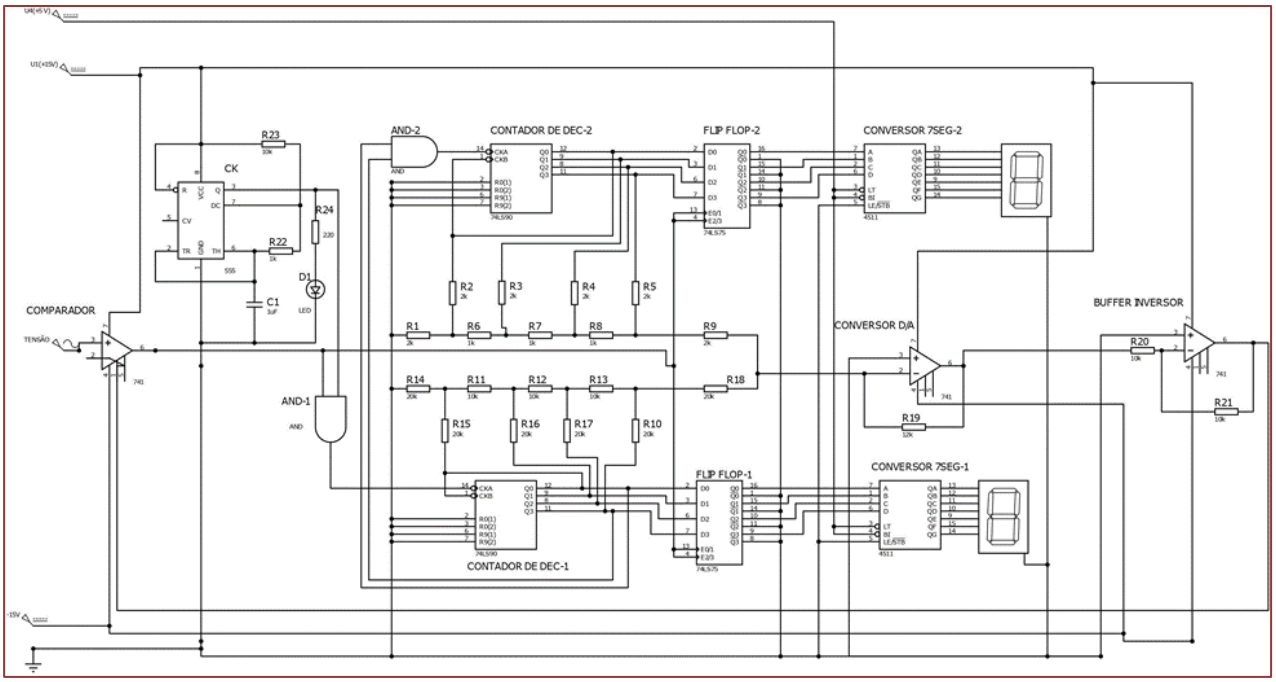
O conversor digital-analógico será responsável por realimentar o comparador. Que vai fazer a comparação desse sinal com o sinal que vai ser medido.

4.1. SIMULAÇÃO

A fim de verificar o funcionamento e a viabilidade do projeto do voltímetro, foram realizadas simulações utilizando o *software Proteus*. As simulações proporcionaram uma oportunidade de testar o circuito antes da montagem física, permitindo a identificação de possíveis problemas e ajustes necessários. No *software Proteus*, o circuito foi montado virtualmente, utilizando componentes como o *flip-flop*, 555, conversor digital-analógico com rede R2R utilizando amplificador operacional e *display*, a Figura 8 evidencia o circuito montado.

Durante a simulação, diferentes valores de tensão de entrada foram aplicados ao circuito, representando as diversas medições que o voltímetro poderia realizar. Foi verificado que o *flip-flop* armazenar corretamente o valor digital correspondente à tensão medida, o 555 gerava o sinal de *clock* necessário e o DAC com rede R2R utilizando amp-op convertia o sinal digital em uma tensão analógica precisa.

Figura 8: Circuito montado no *software proteus*



Fonte: Autoria própria (2023).

Além disso, uma série de testes foi realizada para avaliar o desempenho do voltímetro durante a simulação:

- **Verificação de precisão:** Foram aplicados valores conhecidos de tensão de entrada e os resultados exibidos no *display* foram comparados com os valores esperados. Foi constatado que o voltímetro apresentou uma precisão adequada, fornecendo leituras próximas e consistentes.
- **Avaliação da estabilidade:** O comportamento do *display* ao longo do tempo foi observado, verificando se as leituras se mantinham estáveis sem oscilações indesejadas. O voltímetro apresentou uma resposta estável, demonstrando sua capacidade de fornecer medições confiáveis.

Foram utilizadas técnicas adequadas de impressão da placa de fenolite, soldagem dos componentes e conexões necessárias.

A simulação desempenhou um papel crucial no processo de desenvolvimento do voltímetro. Ela permitiu verificar a interação correta entre os componentes, identificar possíveis problemas de projeto, validar a precisão das medições e a robustez do circuito. Essa etapa contribuiu para economizar tempo, minimizar erros durante a montagem física e garantir um produto final mais eficiente e confiável.

4.2. PROTÓTIPO DO VOLTÍMETRO

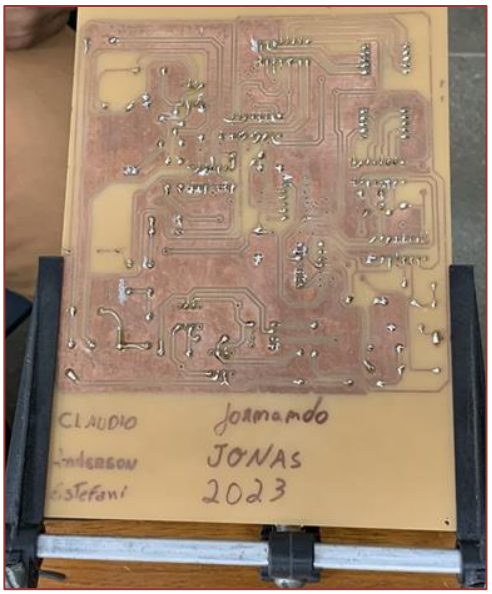
Após a conclusão da fase de simulação, avançou-se para a etapa de construção do protótipo físico do voltímetro. Essa etapa envolveu a montagem do circuito na placa de fenolite e a soldagem dos componentes necessários, seguindo o projeto previamente simulado.

Utilizando o *layout* impresso em papel couché como referência, o circuito foi transferido para a placa de fenolite. Os componentes foram posicionados com cuidado e precisão, garantindo uma conexão correta entre eles. A soldagem foi realizada com atenção aos detalhes, assegurando uma conexão sólida e confiável.

Durante a montagem, foram seguidas as melhores práticas de soldagem, incluindo o uso adequado de estanho e fluxo para obter junções limpas e evitar curtos-circuitos. Foi tomado cuidado para evitar o superaquecimento dos componentes sensíveis, o que poderia comprometer seu funcionamento.

Após a conclusão da montagem, como mostra a Figura 9, foi realizada uma inspeção minuciosa do protótipo para verificar possíveis erros de conexão ou problemas de soldagem. Um multímetro foi utilizado para medir a continuidade e a resistência em diferentes pontos do circuito, garantindo a integridade das conexões e a ausência de curtos-circuitos.

Figura 9: Placa de circuito do voltímetro



Fonte: Autoria própria (2023).

5. PLACA E PLANO DE TERRA

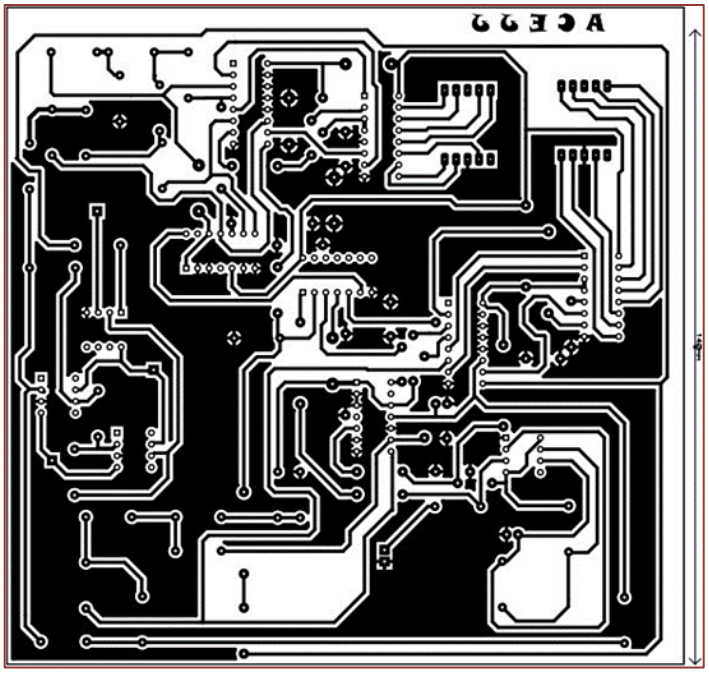
Placa e Plano de terra são conceitos muito utilizados em eletrônica e engenharia elétrica para fornecer um caminho de retorno de corrente eficiente para um circuito eletrônico. O plano de terra é uma camada contínua de cobre na PCB que é conectada à placa de terra e abrange grande área do *layout*, essa configuração ajuda a distribuir uniformemente a corrente de retorno e a minimizar as interferências entre os componentes eletrônicos. É utilizado para fornecer um ponto de referência para as tensões de sinal e para proteção contra surtos elétricos. Ele pode ajudar a evitar *loops* de terra, que são caminhos indesejáveis de corrente que podem causar problemas como zumbidos, interferências ou até mesmo danificar os componentes do circuito (Montrose, 2007).

Ademais, utilizou-se o *software* Proteus, foi possível realizar a montagem e ligação de cada componente do projeto na configuração de circuito impresso, gerando o modelo de Placa PCB, a serigrafia e Modelagem 3D do voltímetro.

5.1. LAYOUT DA PLACA PCB

O *layout* de uma placa PCB é a disposição física dos componentes eletrônicos e das trilhas condutoras na placa. Durante o processo de construção do *layout*, foi preciso posicionar os componentes de forma lógica, considerando suas interconexões elétricas, restrições de espaço e dissipação de calor. As trilhas condutoras são roteadas de maneira eficiente, evitando cruzamentos desnecessários e mantendo distâncias adequadas para evitar interferências. O uso de um plano de terra contínuo ajuda a distribuir a corrente de retorno e minimizar as interferências. Além disso, foram também considerados aspectos como trilhas de alimentação, minimização de interferências eletromagnéticas e análise geral do *layout* mostrado na Figura 10.

Figura 10: Layout placa PCB do voltímetro

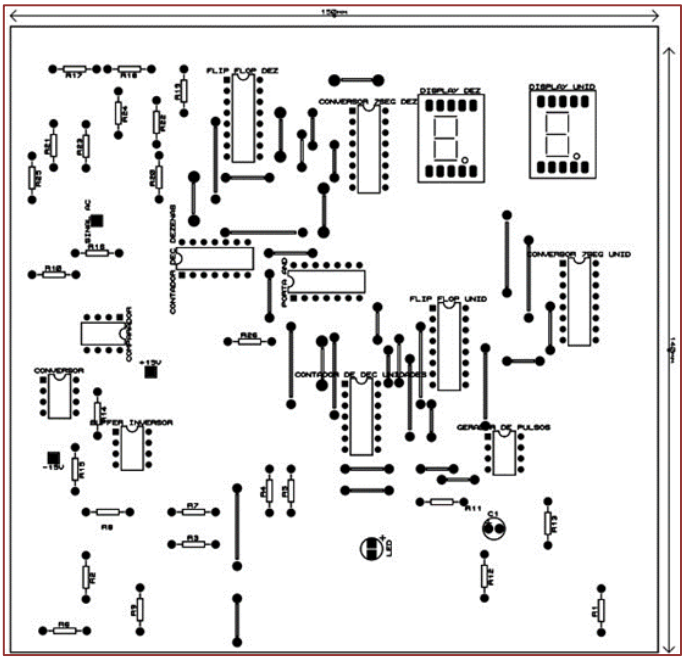


Fonte: Autoria própria (2023).

5.2. SERIGRAFIA

Na fabricação da placa, a serigrafia foi usada para complementar e adicionar informações importantes sobre o projeto, como identificação de componentes, posição de LEDs e resistores, legendas de conexões, e outras marcações relevantes. Essas informações ajudaram no processo de montagem, teste e mudanças no circuito. Na Figura 11 é possível analisar a Serigrafia gerada.

Figura 11: Serigrafia do voltímetro



Fonte: Autoria própria (2023).

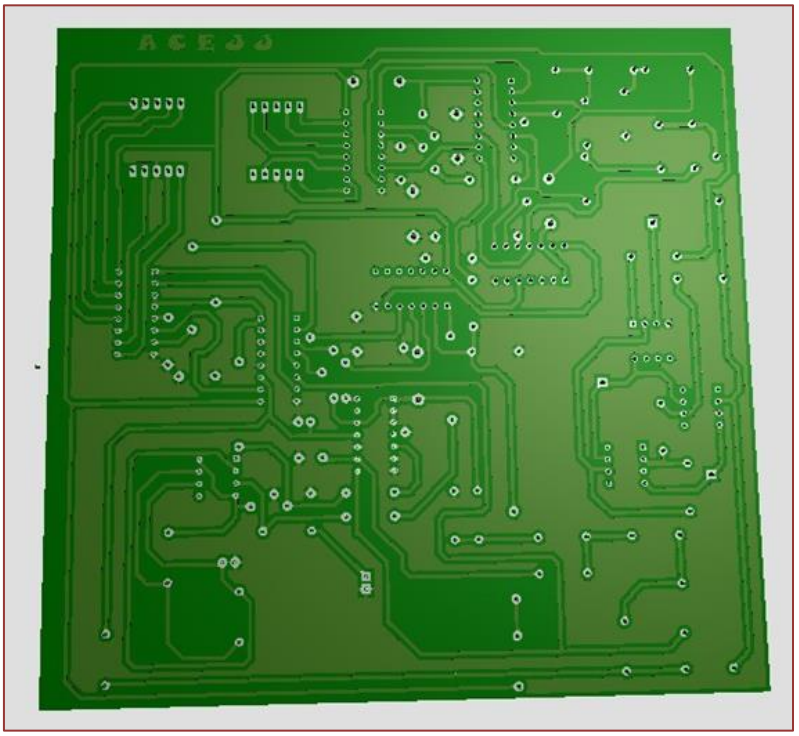
5.3. MODELO 3D

O modelo 3D da placa permitiu identificar problemas de *layout*, detectar erros de design e otimizar o espaço físico. Com ele foi possível visualizar a disposição dos componentes, as trilhas condutoras e outras características importantes do circuito. Isso ajuda a evitar colisões, melhorar a eficiência do *layout* e garantir um projeto de alta qualidade.

Este processo teve um papel fundamental ao oferecer uma visualização precisa e realista do design na perspectiva da parte de trilhas (Figura 12) e parte dos componentes (Figura 13) da placa.

Quanto ao modelo 3D da parte das trilhas, é possível observar as dimensões, a largura e a espessura das trilhas condutoras. Estas podem ser representadas em diferentes cores, com base nas características elétricas ou de design, facilitando a identificação visual de diferentes sinais ou potenciais. também permite visualizar o roteamento em diferentes camadas da placa, destacando as conexões entre os componentes eletrônicos e os pontos de interconexão.

Figura 12: Modelo 3D para as Trilhas da Placa

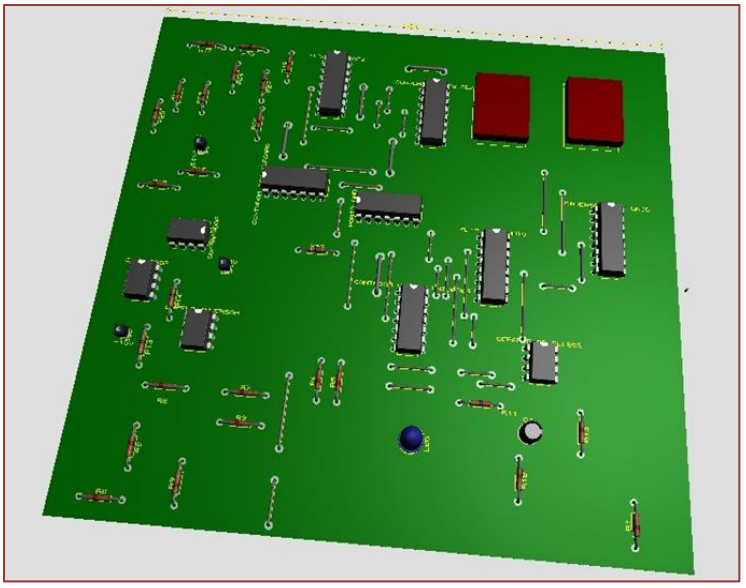


Fonte: Autoria própria (2023).

Quanto à visão dos componentes, cada um é representado de acordo com suas dimensões físicas e características específicas. Isso inclui a forma, o tamanho, os terminais de conexão, os pinos e outros detalhes relevantes do componente. A representação tridimensional pode ser bastante realista, permitindo identificar claramente o formato e a estrutura de cada componente.

Além disso, este modelo pode mostrar a disposição espacial dos componentes na placa, incluindo sua altura em relação à superfície da placa. Isso foi útil para avaliar problemas de sobreposição ou interferência entre os componentes, garantindo que haja espaço suficiente para a montagem.

Figura 13: Modelo 3D para os componentes do projeto



Fonte: Autoria própria (2023).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por se tratar de um projeto complexo, com um alto número de componentes, optou-se por realizar o projeto diretamente na placa PCB, em vez de utilizar montagens convencionais com *Protoboards* e *Jumpers*.

Ao alimentar o circuito, constatou-se que os *displays* e LEDs ligaram com sucesso. No entanto, a contagem e a medição de tensão mostraram-se imprecisas e com falhas. Diante disso, o grupo levantou algumas possíveis causas do problema:

- CIs queimados durante o processo de soldagem devido à exposição a altas temperatura: alguns componentes eletrônicos sensíveis, como Circuitos Integrados, podem ser danificados se forem expostos a temperaturas muito altas por um período prolongado. Os CIs são compostos por uma variedade de materiais, incluindo semicondutores, que possuem limites de temperatura operacional específicos.
- Uso de resistores com valores diferentes dos teóricos devido a taxas de tolerância: com as limitações na fabricação e variações nos materiais utilizados, é inevitável que existam pequenas variações nos valores de resistência dos resistores em relação aos valores teóricos.

Conclui-se que o trabalho foi de extrema importância para o aprendizado do uso de amplificadores operacionais, CIs, conversores D/A e placas PCB na prática. Além disso, demonstrou-se, por meio de simulações e teoria, que é possível construir um voltímetro utilizando esses mesmos componentes. Para trabalhos futuros, o grupo sugere realizar uma análise minuciosa das trilhas e a utilização de soquetes no processo de soldagem, a fim de evitar danos aos CIs e amplificadores operacionais.

REFERÊNCIAS

[1] BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 8ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. 671 p.

[2] IDOETA, I. V. Elementos de eletrônica digital. v. 40, 2003.

[3] MALVINO, Albert Paul. Eletrônica. São Paulo: McGraw-Hill, 1987. 283 p.

[4] PERTENCE JÚNIOR, Antonio. Elementos de Eletrônica Digital. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2003. 302 p.

Capítulo 4

Avanços recentes em aplicações de biossensores

Cleiton Bittencourt da Porciúncula
Bruna Sulzbacher Fischer
Acelia Patrícia Buboltz da Silva Santos
Catharine Venturineli dos Santos
Fabiana de Campos Fiorucci
Sérgio Gilberto Becker
Lucas Machado Câmara
Marina da Cunha Sieben

Resumo: Esta revisão bibliográfica visa uma pesquisa atual da utilização de biossensores em diversas áreas e segmentos. Os biossensores vêm ganhando destaque devido à alta sensibilidade, baixo custo e tempo reduzido. Dentre os diversos tipos de biossensores já existentes, podemos mencionar os imunossensores que são baseados na detecção da ligação antígeno-anticorpo e que desempenham um papel fundamental no monitoramento ambiental, qualidade de alimentos, melhoria da saúde, como Química Analítica, biomarcadores tumorais, diagnósticos clínicos, doenças cardiovasculares, neurodegenerativo, dentre outros. No caso do monitoramento ambiental, dentre as inúmeras técnicas existentes nesse segmento, os biossensores vêm ganhando destaque devido à alta sensibilidade, baixo custo e resposta rápida. Em uma breve comparação entre técnicas convencionais de detecção microbiana e o sistema de biossensores, pode-se obter uma perspectiva de resultados promissores. Os biossensores analíticos desempenham um papel fundamental no monitoramento ambiental, qualidade de alimentos e melhoria da qualidade da água. Na análise qualitativa de alimentos, os biossensores são aplicados, sobretudo, na detecção de contaminantes químicos e biológicos, tais como pesticidas, antibióticos, e microrganismos diversos. Os biossensores atualmente estão se despontando como uma nova abordagem analítica com diferentes características quando comparados a outros métodos tradicionais, através de análises químicas, essa o permite uma análise qualitativa e quantitativa envolvendo uma variedade de substratos e favorecendo uma ampla gama de aplicações com vantagem de os testes possuírem alta sensibilidade e especificidade em relação ao analito. Também podem ser construídos de forma portátil para testes in loco com menor custo. Na parte de bioeletroquímica, há avanços e aplicações recentes utilizando biossensores, tais como a detecção de DNA, imunodetecção e transferência direta de elétrons entre um eletrodo e uma proteína redox. Uma das grandes áreas da pesquisa em biossensores e bioeletroquímica são as nanopartículas, que têm sido usadas para melhorar o desempenho do sensor e desenvolver biossensores com base em novos princípios de detecção.

Palavras-chave: Antígeno-anticorpo, biossensores, imunossensores, genossensores, métodos analíticos, biossensores, monitoramento ambiental, controle de qualidade, água, alimentos, meio-ambiente.

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

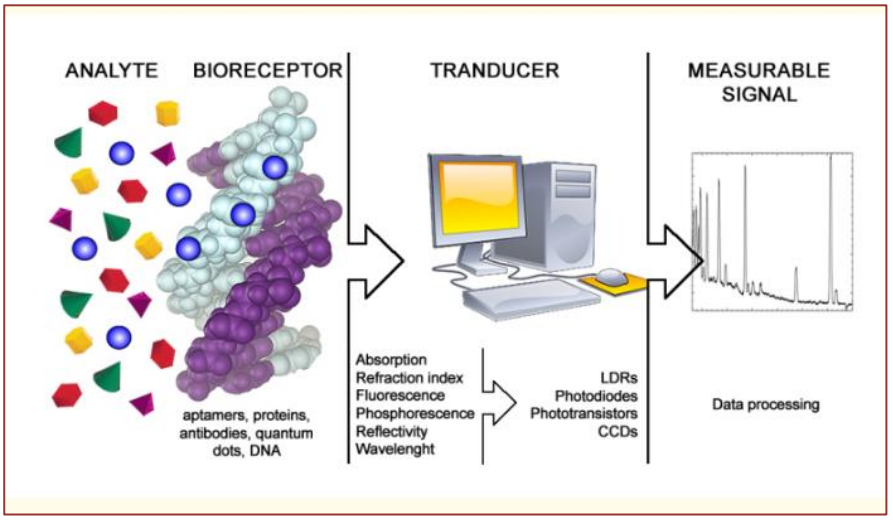
Este trabalho tem por objetivo a elaboração de uma revisão bibliográfica acerca das aplicações do uso de biossensores em diversas áreas do conhecimento, sobretudo na Engenharia, Medicina e Meio Ambiente, onde encontram-se as principais aplicações analisadas. A comparação com as técnicas convencionais de detecção de bactérias e o desempenho analítico dos biossensores formam a parte central dessa discussão. Características como a sensibilidade, especificidade e usabilidade estão sendo aperfeiçoadas em estudos recentes a fim de explorar a sinergia de diferentes tecnologias de sensoriamento, desenvolvendo sensores multiplexados, cada vez mais sensíveis e precisos que permitirão a detecção rápida para segurança alimentar, água e monitoramento ambiental. Os métodos convencionais analíticos de detecção e quantificação microbiana mais comuns, como espectrofotometria e cromatografia, são longos e dispendiosos. Nos bioensaios tradicionais, os resultados são obtidos após o uso de equipamentos ou "conversores" externos. Isto gera, muitas vezes, a necessidade de diversas etapas de processamento das amostras, com maiores custos e tempos de resposta (RODRIGUEZ-MOZAZ *et al*., 2006).

1.2. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DOS BIOSSENSORES

O sensor químico tem sido amplamente utilizado na instrumentação analítica, podendo substituir aparelhos complexos, por se tratar de dispositivos portáteis de fácil manipulação, além de fornecer informações confiáveis sem necessidade de adição contínua de reagentes na operação (ALFAYA e KUBOTA, 2001). Não bastante, desenvolveram-se os biossenssores, afim de identificar e quantificar metabólitos de maneira especifica, rápida e em quantidades muito pequenas de amostras (ROSATTO *et al.,* 2000).

Segundo ALFAYA e KUBOTA (2001) os biossenssores têm por definição, um sensor químico que reconhece um componente biológico ativo, sendo um processo bioquímico a fonte do sinal analítico, trazendo assim, alta seletividade em relação a um determinado analito. Baseia-se na comunicação de um componente biológico ativo que é o reconhecedor, gerando variação na concentração de prótons, variação de massa, mudança no estado de oxidação do analito, dentre outros aspectos e características de interesse, e um transdutor que converte a energia em uma forma mensurável (algo que se pode medir), conforme ALFAYA & KUBOTA 2001; SANTANA *et al*., 2017, como podemos ver na figura 1, de MARTINS, *et al*., (2013). Isto é, com a comunicação destas duas partes, do reconhecedor e transdutor, podemos utilizar diversos materiais biológicos, como enzimas, anticorpos, células, tecidos, ácidos nucléicos e muitos outros organismos na construção de biossensores (MORGAN *et al.,* 1996; GIL *et al.*, 1999; ROCHA, 2014; SANTANA *et al.*, 2017). Por este motivo, os biossensores estão presentes no auxílio de diagnósticos de doenças e monitoramento médico, pela detecção de anticorpos, agentes infecciosos e biomarcadores (GIL *et al.*, 1999; RICCI *et al.,* 2012).

Figura 1 - Esquema representativa de um Biossensor



Fonte: Extraído de MARTINS, *et al.*, (2013).

Os Imunossensores são considerados sistemas de interação imune que é específico para um antígeno (Ag) ou anticorpo (Ac) (SANTANA *et al.*, 2017). Acoplado à superfície de um transdutor, emite um sinal biológico que será obtido conforme a imunoafinidade e convertido em um sinal mensurável. De acordo com a autora ROCHA (2014) "[...] os imunossensores representam uma categoria que merece especial atenção, no que se refere a uma detecção sensível e seletiva."

A técnica de análise consiste na imobilização de antígenos/anticorpos, que durante a interação transmite sinais e reconhecimento molecular (RAMÍREZ *et al.,* 2009*)*, podendo ser utilizado um anticorpo secundário, marcado com enzima (SANTANA *et al.*, 2017). Devido a ocasionar interações do complexo Ag-Ac, alterações físico-químicas estão presentes como as ligações eletrostáticas, ligação de hidrogênio, ligações não covalentes e hidrofóbicas (FARRÉ *et al.*, 2007). Conforme os autores GIL *et al.*, (1999) "[...] estas interações ocorrem a curta distância, de modo que só moléculas contendo determinante antigênico ou muito similares (reatividade cruzada) ligam ao sítio antígeno ligante do respectivo anticorpo."

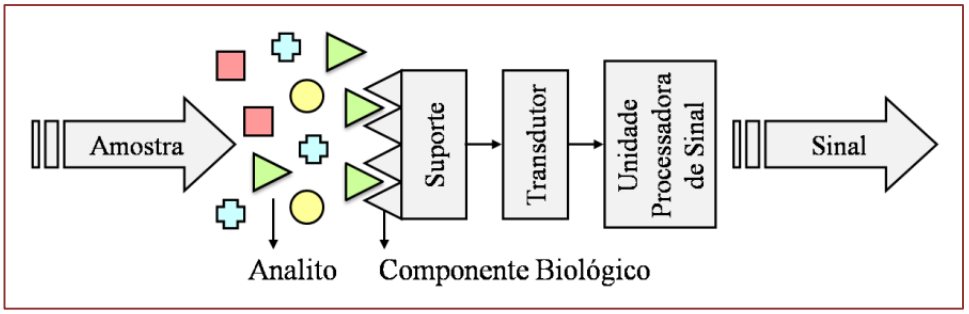
Ainda dentro de sua classificação e características principais, os imunossensores podem ser diretos e indiretos. Os imunossensores diretos possibilitam a detecção de uma mudança física quando o imunocomplexo ainda está se formando, ou seja, monitoram esta interação entre o antígeno e um anticorpo. O resultado desta interação possibilita a medição através dos imunossensores indiretos (ROCHA, 2014). De acordo com os autores RICCARDI *et al.* (2002) no método direto não lançam mão de marcadores, mas em grande parte de imunoensaios se faz necessário a utilização do mesmo, sendo este o método indireto.

Conforme a BRAZACA (2019, p. 31) a identificação de glicose foi um dos primeiros complexos de biomarcadores utilizados. Nos dias atuais, milhares de biomarcadores já estão documentados e procedem diagnósticos de diversidade de males. Dito isso, podemos afirmar que o monitoramento e diagnósticos de diversas doenças vem sido auxiliadas com o uso de biomarcadores. Tendo em vista que o assunto abrange diversas áreas do âmbito da saúde, o presente estudo é separado pelo diagnóstico precoce das

doenças de Leishmaniose Visceral, Alzheimer e Papilomavírus Humano.

Os biossensores são ferramentas analíticas independentes que combinam um elemento biológico com um elemento transdutor. O elemento biológico tem a propriedade de reconhecer e interagir reversível e seletivamente com o analito. O propósito dessa interação é detectar a concentração ou atividade química de uma espécie em uma amostra qualquer a fim de gerar um sinal. O sinal gerado por meio da interação do elemento sensor e do analito de interesse, é então, transformado em sinal elétrico mensurável e quantificável por meio do transdutor. (Figura 2, OLIVEIRA, 2016).

Figura 2: Representação esquemática de um Biossensor, mostrando a organização dos seus componentes



FONTE: OLIVEIRA (2016).

Na superfície do sensor, podem ser empregados biorreceptores como microrganismos, anticorpos, ácidos nucleicos, células inteiras, tecidos (animais ou vegetais), organelas, enzimas, proteínas, entre outros. (OLIVEIRA, 2016) De maneira geral, os biossensores apresentam alguns aspectos positivos e negativos. Segundo Furtado (et. al. 2008), em relação às técnicas convencionais, além da sensibilidade e da seletividade, as vantagens no uso de biossensores estão relacionadas ao monitoramento rápido. Isso porque, geralmente, apresentam praticidade no pré-tratamento da amostra, rapidez nas análises e baixo consumo de reagentes, fatores que determinam redução no custo financeiro sem perder a agilidade na obtenção dos resultados. Uma exceção está presente no uso de biossensores que empregam sequências de DNA como molécula biológica ativa, pois existe a desvantagem referente ao pré-tratamento da amostra. Segundo ZHAO *et. al*. 2022, várias moléculas funcionais de DNA têm sido usadas para detecção de contaminantes ambientais na água, mas suas aplicações práticas são limitadas. Isso ocorre pela necessidade de extração de DNA e desnaturação das fitas de ácido nucléico para, posteriormente, serem submetidas à hibridização com a molécula imobilizada na superfície do sensor (IVNITSKI, 1999).

O monitoramento rápido a partir dos sensores analíticos visa identificar prontamente a presença dos patógenos bacterianos em alimentos, água e meio ambiente. OLIVEIRA (2016), destaca que devido às vantagens de baixo custo, rapidez e potencial para testes de campo, seu uso é indispensável para o avanço sustentável, especialmente em ambientes de poucos recursos, como países subdesenvolvidos. Neste contexto, métodos analíticos e biossensores podem vir a garantir segurança alimentar, qualidade da água e alavancar o monitoramento ambiental.

2. ASPECTOS GERAIS

A liberação indiscriminada de substâncias químicas nocivas no meio ambiente gerada através da industrialização e o crescimento desordenado da população e como consequência uma urbanização rápida onde não é implementado um saneamento correto, esses fatores desencadeiam a poluição ambiental. Os contaminantes lançados na natureza são inúmeros, com características físicas, químicas, biológicas e encontra-se largamente distribuídos, no solo, água, ar, de modo a trazer consequências danosas aos sistemas vivos e em especial a saúde humana (XIONG et al., 2022). Embora o termo biossensor tenha sido descrito ao final da década de 70, sua concepção e utilização já era empregada. No ano de 1962, CLARK e LIONS (2023) desenvolveram um equipamento para análise da glicose que compreendia uma enzima oxidase fixada a um eletrodo para precisar O_2, o resultado reacional entre enzima e a glicose resulta na diminuição de oxigênio dissolvido, a diminuição do O_2 que é detectado pelo eletrodo proporcionalmente à concentração de glicose na amostra. A técnica utilizando microrganismos vivos imobilizados na face de um eletrodo foi aperfeiçoada em 1977 (CAMMANN, 1977). O dispositivo era usado na detecção de aminoácido de arginina, inicialmente esse dispositivo recebeu o nome de "sensor biosseletivo" dessa forma mais adiante esse modelo passou a ser chamado de "biossensor", nomenclatura que permanece nos dias atuais quando se quer caracterizar a junção de um transdutor físico a um material biológico.

O estudo relacionado do comportamento dos elementos químicos sobre os organismos vivos já é empregado há muito tempo, no entanto o desenvolvimento de tecnologia que visa o emprego de biossensores é contemporâneo. O aproveitamento da capacidade das células interagirem com diferentes componentes químicos permite amplificar uma variedade de aplicações, através do potencial em obter diferentes respostas quando aplicado a diferentes condições alteradas (FRENCH, 2019). Diante desse mecanismo versátil dos biossensores, se aumentou o interesse no desenvolvimento dessa tecnologia além dos avanços científicos relacionados à nanociência os quais vêm contribuindo de forma significativa na elaboração de produtos inovadores utilizando materiais nanoestruturados (QUERESHI, *et al*. 2009; LI, *et al*. 2008).

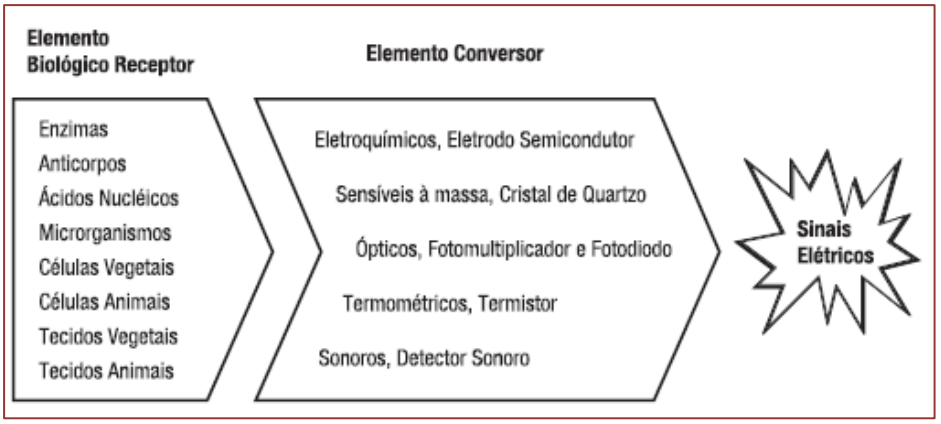
Quando comparado aos métodos químicos tradicionais, o que tem gerado interesse nessa técnica é quanto a sua capacidade de precisar quanto à biodisponibilidade de uma substância química e também relacionar quanto aos seus efeitos biológicos. A grande diversidade de aplicações abrange o emprego em diversas áreas, como: na área de nutrição potencializando a absorção e nutrientes, quanto aos efeitos de novas drogas na área da medicina, na área ambiental pode ser empregado na avaliação de solo e aquíferos quanto aos seus componentes químicos presentes, o monitoramento com biomarcadores admite uma análise precisa com abrangência fidedigna do território com valores mais baixos (GIROTTI *et al*., 2008). A receptividade alta em relação aos contaminantes pode proporcionar uma leitura pelos bioindicadores quanto aos atributos ambientais do solo (BUTTERWORTH *et al*., 1995). Dentre os conhecimentos que podem ser adquiridos nas avaliações de solo podem ser (1) alterações como aumento ou diminuição na diversidade de microrganismos no solo, (2) presença ou ausência de um microrganismo específico, (3) os aspectos de um dano causado no solo, se o mesmo é passível de reversão ou não. As características que um bioindicador deve possuir: fácil identificação, ser facilmente expressado, ser amplamente conhecido na área cientifica, reduzida motilidade, curso de vida duradouro, possuir invariabilidade genética e estar presente o ano todo. Recentemente esses dispositivos obtiveram grande enfoque em razão da sua simplicidade de elaboração, baixo custo, alta precisão, e presença de poucos interferentes no

sensoriamento de micropoluentes (RASSAEI *et al*., 2011).

Com os biossensores é possível construir uma malha em áreas a serem monitoradas com ampla abrangência territorial, não necessitando equipamentos sofisticados e sem necessidade de energia. Com esse conceito é importante a acessibilidade a diferentes tipos de bioindicadores seguros para aplicar o sistema (IRITI *et al*., 2006). A amplificação na diversidade de análise utilizando meios de biologia sintética sem células objetivando identificar componentes químicos além do DNA e RNA assume importância tendo em vista controlar peculiaridades hídricas quanto a poluição. Mundialmente 80% da população está submetida à ameaça de não terem acesso à água potável, tendo (VÖRÖSMARTY, 2010). Muitos poluentes presentes no solo e na água com potencial de grande toxicidade através dos métodos atuais aplicados para sua detecção torna um processo que necessita de grande sofisticação de laboratório, cuja dificuldade na detecção encarece muito a análise sendo que esses testes devem ser destinados a laboratórios que possuam instrumentos de ponta e profissionais específicos necessários.

Com a expansão do desenvolvimento de bioanalisadores, diversos enfoques com múltiplos arranjos são empregados. RODRIGUEZ-MOZAZ *et al*. (2005) descreveram os biossensores como: "Biossensor é um sistema autônomo integrado, composto de um elemento biológico receptor em contato direto com um elemento conversor, o qual é capaz de converter a reação entre o elemento biológico e o analito de interesse em um sinal mensurável" (Figura 3, NAKAMURA e KARUBE, 2003).

Figura 3: Representação esquemática dos biossensores



Fonte: (adaptado de NAKAMURA E KARUBE, 2003).

2.1. BIOSSENSORES

Como já dito anteriormente, os primeiros biossensores foram baseados em glicose oxidase (GOD), desenvolvido por Clark e Lyons, em 1962. Os pacientes diabéticos, que possuem uma elevada concentração de glicose no sangue, devem fazer o monitoramento frequentemente, para isso segundo SONG *et al.* (2006) o Biossensor de Clark que é um eletrodo imobilizado com GOD, na presença de glicose é oxidado produzindo ácido glucônico e GOD reduzido, envolvendo assim dois prótons e dois elétrons. Ainda segundo os autores:

> "Essa oxidação da glicose também consome oxigênio em solução, uma vez que o oxigênio dissolvido reage com o GOD reduzido, formando assim o

> peróxido de hidrogênio e o GOD oxidado, e diminui a pressão do oxigênio. Como resultado, o eletrodo pode detectar a glicose detectando eletroquimicamente o oxigênio com um eletrodo de oxigênio Clark. Esse tipo de sensor é chamado de biossensor de "primeira geração". Este biossensor de primeira geração foi comercializado na década de 1970 pela Yellow Springs Instrument Company (Ohio, EUA)."

Os biossensores de "segunda geração" substituem o oxigênio por moléculas redox artificial que servirão como mediador redox, que conforme a variedade da molécula empregada confere melhor desempenho do sensor, sensibilidade e relação sinal-ruido. Estas moléculas podem ser tionina, azul de metileno, metilviologênio, ferroceno na qual trocam elétrons entre eletrodos e enzimas e estes elétrons serão transportados até o centro redox das enzimas, ou vice-versa (SONG *et al.* 2006). Com a facilidade de transferência de elétrons por meio destas moléculas mediadoras, diversas reações de interferências também surgiram (FREIRE *et al*. 2003).

Estes biossensores clínicos que detectam a glicose no sangue, conforme mencionam SONG *et al.* (2006) em seus estudos:

> "[...] não é necessária uma sensibilidade muito alta para a detecção de glicose, pois a concentração de glicose é alta no sangue. Isso é realmente parte da razão para o sucesso dos monitores de glicose. No entanto, em muitos casos, é muito importante desenvolver biossensores altamente sensíveis, detecção otimizada de uma única molécula, a fim de atender aos requisitos de diagnóstico molecular e detecção de patógenos."

Por isso que os biossensores da "terceira geração" como mencionam SADIK *et al.* (2010), a transferência eletrônica está diretamente associada à transformação catalítica do substrato no produto, onde a enzima redox facilita a transferência de elétrons sem envolver mediador entre o eletrodo e o substrato, atuando como uma espécie de eletrocatalisador. Funcionam de forma mais próxima do potencial redox da própria enzima deixando-a menos exposta às reações interferentes.

2.2. GENOSSENSORES

Em relação aos genossensores, como já vimos anteriormente, são aplicados na detecção de doenças genéticas, infecciosas e proporcionam um monitoramento de danos e interações ao DNA (MURUGAIYAN et al., 2014). De modo geral são desenvolvidos por imobilização de fita simples de DNA (sonda) e a detecção alvo complementar pode ser medida de forma direta e indireta, onde utiliza-se um indicador de hibridização (PERUMAL e HASHIM, 2014). A sonda deve ser bem definida e acessar de maneira fácil o alvo e diversos são os métodos para imobilizar a sonda sobre a superfície do transdutor (SILVA et al., 2009; TELES e FONSECA, 2008). Por sua vez, os ácidos nucleicos são considerados ótimos para sonda, pois oferecem alta especificidade, são reutilizáveis e facilmente sintetizados (MURUGAIYAN et al., 2014).

De acordo com SOARES et al. (2018) “Desde que a especificidade do genossensor é determinado pela sequência de DNA da sonda de captura, genosensores podem ser projetados especificamente contra biomarcadores de DNA para diferentes tipos de tumores, ampliando o uso desta plataforma de genossensores microfluídicos para outras doenças”.

2.3. IMUNOSSENSORES

Nos Imunossensores, o anticorpo ou o antígeno são imobilizados em superfície do transdutor e são elementos de reconhecimento que requer especificidade (RICCI *et al.,* 2012). Dentre as estratégias de imobilização de enzimas, podemos citar as de ligação covalente, aprisionamento, encapsulamento, adsorção, ligação cruzada e afinidade (SASSOLAS *et al.,* 2012). Os métodos são classificados conforme a interação da enzima e o analito alvo. Quando a enzima metaboliza o analito, a concentração pode ser determinada por medição da transformação catalítica do analito em relação à enzima imobilizada. No entanto quando a atividade enzimática é inibida pelo analito, podemos aplicar outro método que consiste na detecção da diminuição do que foi formado do produto da enzima. (FARRÉ e BARCELÓ, 2007).

Segundo os autores SONG *et al.* (2006) “Os biossensores imunológicos são, na verdade, uma nova versão do ensaio imunoenzimático (ELISA), com custo reduzido, maior velocidade e conveniência de operação e sensibilidade comparável ou até maior. “

2.4. MÉTODOS EMPREGADOS

Diante dos diversos avanços da biologia molecular, genética, bioquímica e imunológica, as biomoléculas são comumente utilizadas na construção de biossensores e este elemento biológico pode ser constituído por enzimas, anticorpos, células, peptídeos e ácidos nucleicos. Cada um destes elementos possui suas vantagens na detecção do analito alvo (ALVES, 2014). Os transdutores que nos fornece o tipo de leitura, podem ser classificados conforme o sinal elétrico mensurável, ou seja, calorímetros, ópticos, eletroquímicos e piezoelétricos.

2.4.1 ELETROQUÍMICOS

Os biossensores eletroquímicos se baseiam no consumo de espécies eletroativas onde o transdutor mensura o sinal eletroquímico que é emitido pelas interações químicas e biológicas destas espécies. (ALVES, 2014). As técnicas eletroquímicas empregam propriedades elétricas como carga, resistência, condutividade, corrente e potencial. Tais medidas são de fácil acesso experimental e adequa-se na quantificação de espécies de interesse (SOUZA *et al.,* 2003), sendo estes os biossensores mais comuns e empregados em estudos de análises clinicas (SONG *et al*., 2006).

Como exemplos empregados, podemos citar os amperométricos, potenciométricos e espectroscopia de impedância eletroquímica. Segundo SUSANTO *et al.* (2013) os biossensores amperométricos são os mais atraentes e lideram entre os sistemas já disponíveis, devido a sua sensibilidade e ampla faixa linear. Estando diretamente associada a taxa da reação biocatalítica a um sinal de corrente, estes biossensores conferem determinação simples, direta e rápida de variados compostos (SUSANTO *et al.,* 2013). A cronoamperometria, que é uma técnica eletroquímica, é determinada pela

corrente que flui pelo eletrodo de trabalho como função do tempo, em relação ao potencial fixo e o fluxo é referenciado com o gradiente de concentração das espécies que foram oxidadas na superfície de trabalho (FERREIRA e AVACA, 2008).

A técnica de potenciometria foi desenvolvida em 1922 por Jaroslav Heyrovsky, que resultou no Prêmio Nobel de Química no ano de 1959. A voltametria requer um potencial em função do tempo, que é aplicado no eletrodo de trabalho, em que a corrente resultante flui através do eletrodo de trabalho e um eletrodo auxiliar. Geralmente, o eletrodo auxiliar é feito de platina e o eletrodo de referência pode ser constituído de prata/cloreto de prata, calomelanos e diversos outros tipos de materiais, como platina, mercúrio, grafite, ouro e prata (HOUSSIN e SENEZ, 2014).

A espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) é uma técnica que nos fornece e permite observar alterações da superfície pelas mudanças da resistência e transferência de elétrons (TSIERKEZOS *et al.*, 2014). Está técnica engloba análise das propriedades resistivas e capacitivas de materiais, constituído na perturbação de um sistema que está em equilíbrio por um sinal de excitação sinusoidal de pequena amplitude (GUAN *et al.*, 2004).

2.4.2. PIEZOELÉTRICOS

De modo geral, são biossensores que se baseiam na detecção de mudança de massa devido a interação alvo em relação ao elemento de reconhecimento. Em um cristal de quartzo oscilante teremos a aplicação de um estresse mecânico que causa uma certa mudança de frequência que será relacionada com a ligação do alvo e acarretará mudança na massa (FARRÉ e BARCELÓ, 2007).

Os dispositivos de onda acústica de superfície (*Surface Acoustic Wave* - SAW) tem sido utilizado nos últimos anos no campo bioanalítico e de biossensores. Segundo LUO *et al.* (2013), que desenvolveu em um estudo de um biossensor SAW para detecção de açúcar no sangue afirma “O biossensor SAW do modo ZnO dopado com Mn pode ser totalmente integrado aos chips CMOS Si e desenvolvido como um sistema de detecção em tempo real portátil, passivo e sem fio para monitoramento de açúcar no sangue em soro humano”.

2.4.3. CALORIMÉTRICOS

Envolve propriedades fundamentais como absorção ou liberação de calor, onde utiliza-se variações de temperaturas nas reações biológicas, entre o reconhecedor e o analito alvo, no meio reacional. Está técnica predomina em bioanálises e os dois tipos consideráveis são em condução adiabática e a calorimetria de condução de calor (DANIELSSON, 2000). A detecção é medida conforme o resultado da diluição ou mistura dos componentes, ou seja, do calor produzido e não do calor gerado devido à ação enzimática. No entanto apresentam alto custo (MELO, 2008).

Em uma pesquisa de revisão os autores YAKOVLEVA *et al.*, (2013) descreveram os princípios destes biossensores térmicos e microbiossesores:

> “Vários conceitos de biossensores térmicos apresentados recentemente são revisados, incluindo um sensor híbrido termoeletroquímico para lactose baseado em celobiose desidrogenase imobilizada. Outro método recente é a determinação de frutose usando uma coluna de frutose-6-fosfato quinase. A operação com matrizes de amostras complexas, como

sangue, plasma e leite, e como evitar efeitos de temperatura não específicos são considerados."

2.4.4. ÓPTICOS

Tais sensores são considerados mais versáteis que os demais, pois conferem excelentes propriedades físicas, seletividade e sensibilidade. São produzidos em diversos tipos de materiais, como vidro, metais, silício e polímeros, podem detectar várias substâncias em um único dispositivo. A transdução se baseia na espectroscopia Raman ou absorção óptica. Dentre os mais estudados nas últimas duas décadas são os baseados em índice de refração (BANULS *et al.,* 2013). Em um meio ionizante, qualquer substância pode se tornar um condutor em material dielétrico comum, por isso a polarização das moléculas em um determinado comprimento de onda óptico está relacionado com o índice de refração. As moléculas de ar e água, por exemplo possuem um índice de refração menor do as moléculas biológicas, diminuindo a velocidade dos campos eletromagnéticos que se propagam quando passam por elas. Dentre os métodos aplicados, podemos citar interferometria de polarização dual, a ressonância de superfície de plasma, tecnologia de cristais e a espectroscopia de interferência reflectométrica (GERARD *et al.,* 2002). O quadro 1, extraída de SILVA (2011) elucida resumidamente a classificação e os tipos de biossensores:

Quadro 1 – Transdutores empregados em biossensores

Biossensores	Sistemas de Transdução	Medição	Aplicações Típicas
Eletroquímicos	Amperométrico	Corrente	Substratos enzimáticos e antígenos/anticorpos.
	Potenciométrico	Tensão	Íons, gases, espécies redox.
	Condutimétrico	Condutância	Reações catalisadas por enzimas.
	Impedimétrico	Impedância	Imunossensores enzimáticos.
Acústicos	Cristais piezoelétricos, equipamentos de superfície acústica.	Variação de massa	Gases voláteis, vapores e analitos imunológicos.
Ópticos	Optoeletrônicos, fibras ópticas, equipamento de ondas guiadas.	Variação de luminosidade, índice de refração.	pH, substratos enzimáticos, analitos imunológicos.
Calorimétricos	Termistores, diodos.	Calor.	Enzima, organela, vitaminas, analitos imunológicos.

Fonte: extraído de SILVA (2011).

Apesar dos avanços tecnológicos e estudos relevantes no desenvolvimento e aprimoramento de biossensores, as técnicas já existentes não preenchem os requisitos necessários para um diagnóstico com precisão e além de oferecer um custo operacional baixo, os dispositivos analíticos podem detectar diversos agentes infecciosos dependendo do material em que são desenvolvidos, sendo estes uma alternativa promissora para diagnósticos precoces.

Dito isso, veremos a seguir as técnicas empregadas no desenvolvimento de genossensores, Imunossensores e biossensores para a diagnóstico precoce da doença Leishmaniose, Alzheimer e Papilomavírus Humano.

3. DIAGNÓSTICO DE DOENÇAS POR INTERMÉDIO DE BIOSSENSORES

3.1. LEISHMANIOSE

Causada por um protozoário do gênero *Leishmania* (CASTELLANO *et al.*, 2009), a Leishmaniose afeta milhões de pessoas e em sua forma mais grave temos as espécies *Leishmania donovani e Leishmania infantum que causam* Leishmaniose Visceral (GUTIÉRREZ *et al.*, 2017). Em pacientes assintomáticos ou poucos sintomáticos, o diagnóstico sorológico, por não ser adequado à sensibilidade e especificidade e que está disponível no momento, não atende às expectativas (MATOS *et al.*, 2015).

Novos métodos de biossensores eletroquímicos vem sendo desenvolvidos para otimizar e substituir técnicas tradicionais já empregadas, como portabilidade, seletividade e pequena utilização de amostras. Tais metodologias para que imunossensores sejam adequados, as mesmas devem ser rápidas, de fácil manuseio e ser possível a detecção em pacientes assintomáticos, sendo este essencial no controle e tratamento de Leishmaniose (MARTINS *et al.*, 2020).

Pesquisadores MOHAN *et al.* (2011) utilizaram uma placa de vidro condutora de óxido de índio-estanho para obter um genossensor (baseado em material genético) modificado com óxido de níquel (NiO) nanoestruturado, afim de distinguir DNA de parasitas extraídos do DNA humano, os testes ainda não foram testados em humanos. No ano de 2016, MORADI *et al.* desenvolveram um Genossensor baseado em nanopartículas de ouro que imobilizados em discos de ouro policristalino forneceram alta sensibilidade para a Leishmaniose cutânea. Estes processos de extração de DNA têm alto custo se comparado com o uso de antígenos proteicos. Além do mais, o desenvolvimento de ferramentas portáteis são fundamentais para o diagnóstico de *Leishmania sp*. bem como a necessidade de modificações das técnicas e métodos já aplicados.

Para isso os pesquisadores MARTINS *et al.* desenvolveram um Imunossensor eletroquímico que visa a detecção de anticorpos para a doença Leishmaniose Visceral. Propuseram um eletrodo de carbono serigrafado, afim de garantir adsorção efetiva, e foi modificado com ouro por eletrodeposição (nanopartículas de ouro). Foram escolhidos pacientes com Doença de Chagas ou Leishmaniose e os resultados deste estudo dos autores MARTINS et al. (2020) resultaram:

> "Análises comparativas com ELISA foram realizadas com os mesmos grupos, e uma baixa especificidade (44%) foi verificada devido a reações cruzadas (alto número de falsos positivos) nos testes de ELISA, enquanto o imunossensor proposto apresentou alta seletividade e especificidade (100%) sem nenhum falso positivo ou falso negativo para as amostras de soro de pacientes isolados com diferentes tipos de DC e leishmaniose

> visceral. Além disso, o biossensor ficou estável por 5 dias e apresentou limite de detecção de 200 ng mL^{-1}."

Neste recente de estudos práticos, os Imunossensores ofereceram grandes expectativas para o diagnóstico específico e seletivo da Leishmaniose Visceral.

3.2. ALZHEIMER

O envelhecimento é sem dúvida um processo biológico irreversível a todo ser. Algumas doenças possuem idade-dependência, ou seja, conforme a idade aumenta o aparecimento de diversas doenças (SANTOS & RIFIOTIS, 2003) e dentre muitas, está a demência. Define-se demência distúrbios crônicos que comprometem o sentido cognitivo e funcional (Global Burden of Disease Study, 2019). Uma das doenças que causam demência devastadora de acordo com PRINCE *et al.* (2013) é a doença de Alzheimer. Pesquisas indicaram no ano de 2016 de acordo com Global Burden of Disease Study (2019) indivíduos portadores de demências aumentou 117% de 1990 a 2016, prevalecendo mais entre as mulheres do que nos homens. Previsões indicam que o número de indivíduos com doença de Alzheimer poderá triplicar em 2050 (PRINCE *et al.,* 2013).

Outros fatores que influenciam o aparecimento de doenças devem ser levados em conta, como hábito de fumar, diabetes, colesterol alto, herança genética, estilo de vida, hipertensão arterial, dentre outros (NORTON, et *al.*, 2014). Um estudo realizado na Universidade de Cambridge relata que um em cada três casos de Alzheimer poderia ter sido evitado somente por mudanças comportamentais e sedentarismo (ALZHEIMER'S SOCIETY, 2018). Dito isso, o diagnóstico precoce em pacientes propensos a desenvolver Alzheimer pode fazer com que os números de doentes diminuem, aliando ferramentas eficientes combinado com aconselhamentos a estes pacientes pode evitar o aparecimento da doença.

No desenvolvimento de um dispositivo microfluídico baseado em papel, a autora BRAZACA (2019) descreve a construção deste dispositivo afim de quantificar dois tipos de biomarcadores para a doença de Alzheimer, a Clusterina e a Fetuína B. Segundo a pesquisadora BRAZACA (2019):

> "[...] foram utilizados anticorpos específicos para cada uma das proteínas marcados com nanopartículas de ouro (AuNPs). As AuNPs são posteriormente quantificadas através de técnicas eletroquímicas e colorimétricas. Os dispositivos se mostraram capazes de quantificar as proteínas simultaneamente com boa precisão e reprodutibilidade. Espera-se que o desenvolvimento destes biossensores auxilie no aumento da precisão e do número de diagnósticos da doença de Alzheimer, especialmente em casos precoces."

Este estudo nos mostra que um conjunto potencial de biomarcadores sanguíneos é mais eficiente, tendo em vista que uma única molécula não consiga fazer o diagnóstico com credibilidade. Por isso a pesquisadora utilizou dois biomarcadores de alta relevância, Clusterina e a Fetuína B.

As Fetuínas são proteínas plasmáticas que desempenham variadas funções, sua concentração está relacionada com os volumes esquerdo e direito do córtex entorrinal. Os pacientes com atrofia cerebral que se submeteram a este estudo identificaram baixas taxas de Fetuína B. A Clusterina por sua vez, é abundante em lipoproteínas de baixa densidade, está diretamente associada às taxas de declínio cognitivo. Estudos correlacionados afirmam que os pacientes com decaimento mais relevantes apresentaram alta taxa de Clusterina se comparados a pacientes com decaimento lento (THAMBISETTY, M *et al.*, 2010; HAROLD, D. *et al.* 2009).

De acordo com a autora em questão, utilizou-se Ab (anticorpo) marcados com AuNP (nanopartículas de ouro) onde foram quantificados através da técnica de voltametria de redissolução e colorimetria. O resultado foi relacionado à concentração de proteínas na amostra, onde os parâmetros calorimétricos apresentaram para Fetuína B e para Clusterina, o que representa boa reprodutibilidade.

3.3. PAPILOMAVÍRUS HUMANO (HPV)

De acordo com os autores CUZICK *et al.* (2006) e SOHEILI *et al.* (2021) o papilomavírus humano (HPV) é uma das infecções virais sexualmente transmissíveis mais prevalentes e comum em todo o mundo. De modo geral, a patogenia e a forma de transmissão ainda são desconhecidas para muitos da população, o que favorece sua disseminação (CUZICK *et al.*, 2006).

Há dois grupos de HPVs, os de baixo risco que ocasionam as verrugas genitais e o tipo HPV de alto risco (SOHEILI *et al.* 2021) que está associado ao desenvolvimento de lesões cervicais quando infecta células epiteliais e progride ao câncer do colo do útero (SANTOS, 2008; FERREIRA, 2014). Os mecanismos do HPV de alto risco influenciam o ciclo da divisão celular que leva a sua desregulação, ou seja, causa modificações morfológicas e funcionais, o que promove o aparecimento de neoplasias (SOUZA *et al.*, 2015). Os genes precoces e tardios do HPV que são os E2, E4, E5, L1 e L2 omitem estes genes após a integração do DNA viral no genoma do hospedeiro, sendo duas proteínas que possuem o potencial oncogênico, conhecidas como a E6 e E7 (KAVATI, 2012). Segundo SOARES *et al.* (2018) estes casos de alto risco podem evoluir para um câncer de cabeça e pescoço, aparecendo na garganta, faringe, boca, língua, traqueia devido à mutação destas células.

Dados obtidos pelo estudo bibliográfico de SOHEILI *et al.* (2021) nos mostram que 50% a 80% das mulheres que são ativas sexualmente serão de alguma forma infectadas pelo vírus HOV durante a vida. Como não se tem tratamento definitivo ao HPV, a vacinação hoje é o método de prevenção e tratamento para sua eficácia e no futuro próximo; as vacinas devem ser multivalentes para todos os tipos de HPV e consequentemente conforme SOHEILI *et al.* (2021) mais caras que as atuais. Estatísticas ainda nos mostram que 90% dos vírus de HPV ficam inativos em média 1 a 2 anos após a infecção e as mulheres que tiveram soro positivo para HPV de alto risco desenvolvem câncer cervical após 3 a 5 anos (SANJOSE *et al.,* 2010).

Diante do exposto, uma forma de prevenção em fase pré-clínica onde não se tem sintomas, a detecção em mulheres é possível por meio do esfregaço citológico de raspagem do colo

do útero, o exame Papanicolau (SOHEILI *et al.*, 2021; HARRISON, 2000). Diversos autores questionam sobre as formas de tratamento e as vacinas já disponíveis. SOUZA et al., (2015) cita:

> "O conhecimento acumulado, principalmente nas últimas décadas, sobre a biologia viral, a carcinogênese e a imunogênese do HPV permitiram desenvolver métodos de diagnóstico e modelos de vacinas que contribuem para que metas venham a ser alcançadas com êxito. Mas ainda há muitas perguntas sem respostas e mulheres morrendo por causa deste tumor".

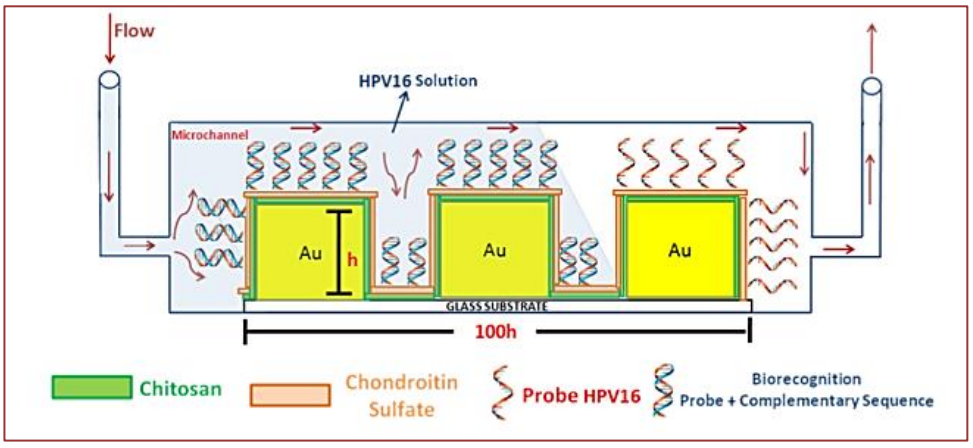
O autor SOHEILI *et al.* (2021) em sua pesquisa recente menciona que "Ainda não existe um tratamento definitivo bem sucedido." Portanto, o uso de biossensores de DNA se faz fundamental no diagnóstico precoce, pois quanto mais tarde a descoberta do Papilomavírus (HPV) maior a chance de inviabilizar o tratamento tendo em vista que o seu desenvolvimento acarreta na progressão do câncer do colo uterino. Uma pesquisa recente associada a este tema, desenvolvida por SANTOS (2008) um Genossensor afim de detectar sequências do vírus HPV utilizando como mediador químico azul de metileno (AM), a transdução se deu por meio de Voltametria de Pulso Diferencial (VPD) e os eletrodos de referência foram produzidos em superfície de polivinil álcool e constituídos de carbono e Ag/AgCl. De acordo com a autora em questão:

> "[...] O eletrodo de trabalho foi modificado com quitosana para a imobilização de pequenas sequências de DNA para hibridização com uma sequência alvo. A sequência alvo usada para hibridização foi o gene E6 do HPV18, uma cadeia extensa com 500 pares de bases disponíveis para anelamento com sequências de 20 bases. Análises de bioinformática foram realizadas para verificar possíveis regiões de anelamento destas sequências curtas ao genoma viral. Os resultados demonstraram um aumento no sinal do AM quando a hibridização ocorreu, evidenciado pelo aumento dos picos de corrente de VPD analisados graficamente. As diferenças entre os sinais emitidos a partir de um eletrodo contendo reações de hibridização e outro isento das mesmas, foi usada para detectar sequências de DNA viral obtidas de amostras clínicas."

Este estudo resultou ser passível de aplicações, sendo a técnica de impressão um instrumento viável na elaboração de biossensores de DNA. Outra pesquisa recente realizada pela IFS/USP (Instituto de Física de São Carlos), por SOARES *et al.* (2018) relataram que exames clínicos não são passíveis na rotina dos sistemas públicos de saúde devido ao alto custo e limitação destes testes já existentes no diagnóstico do HPV de alto risco. Por isso foi desenvolvido um Genossensor, conforme Figura 4, de baixo custo afim de detectar baixas concentrações de HPV16 em amostras tampão. O princípio de detecção foi produzido pelo método camada por camada (LbL) - *layer-by-layer* - onde foi possível distinguir com alta precisão, as linhagens de células cancerígenas de pescoço e cabeça. Neste biossensor, utilizou-se eletrodos microfluídicos com dois polímeros naturais biodegradáveis e biocompatíveis, a quitosana (CHT) - *polymeric architectures of chitosan* – e o sulfato de condroitina (CS), presente no tecido cartilaginoso dos seres humanos, para ancoragem de sonda de DNA para detectar HPV16. Quando este filme entra em contato com células infectadas por HPV16 gera um sinal elétrico e a partir daí se detecta se o indivíduo possui chances altíssimas de desenvolver algum tipo de câncer de

pescoço/cabeça no futuro. As técnicas de caracterização aplicadas incluem espectroscopia PM-IRRAS e microbalança de cristal de quartzo.

Figura 4 – Representação esquemática do funcionamento de um eletrodo e detecção do HPV16 em fluxo contínuo



Fonte: Extraído de SOARES *et al*. (2018).

Os resultados para estes genossensores produzidos mostraram ser quimicamente estáveis e em amostras comerciais apresentaram alta sensibilidade e seletividade. Conseguiu-se distinguir, segundo os autores, através da técnica de projeção multidimensional, HPV16 positiva de HPV16 negativa. Este método de detecção pode ser totalmente replicado devido à sua simplicidade e baixo custo, com o intuito de ser aplicado em hospitais e clínicas médicas. De acordo com SOARES, C. A. *et al.* (2018) "[...] demonstrou-se ser uma possível triagem de rotina para infecções por HPV."

Em 2014, FERREIRA (2014), da Universidade Federal de Pernambuco, desenvolveu dois biossensores. O primeiro foi desenvolvido por lápis de grafite como o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência feito de Ag/AgCl. O alvo gene foi o E6 do HPV16 clonado no plasmídeo PGEM-T. O segundo biossensor é formado por três eletrodos impressos: o eletrodo de trabalho constituído de ouro, um eletrodo de referência constituído de Ag/AgCl e o terceiro auxiliar constituído de carbono. Neste segundo biossensor o DNA extraído de amostras de pacientes e os alvos foram os oligonucleotídicos sintéticos.

Para ambos os biossensores uma sonda de DNA específica ao gene E6 do HPV16 foi imobilizada por adsorção sob o eletrodo de trabalho, após, a sequência alvo foi hibridizado com a sonda imobilizada. As técnicas utilizadas nos dois biossensores foram de voltametria de pulso diferencial. Ambos puderam diferenciar os hibridizados de não-hibridizados. Segundo a autora FERREIRA (2014) que descreve estes novos biossensores:

> "Os resultados mostraram que os biossensores puderam diferenciar a hibridização da não-hibridização. Os dois biossensores propostos apresentaram elevada sensibilidade cujos limites de detecção foram para o primeiro biossensor de 16 pg/µL (7 nM) e o segundo biossensor de 18,13 nM. Além disso, ao contrário dos testes padrão, os dois genossensores foram capazes de detectar a presença do DNA viral sem a necessidade de amplificação do material genético. Isso os tornam mais rápidos e baratos em comparação aos testes convencionais."

Nestes testes, os dados obtidos mostraram-se favoráveis na viabilidade para o diagnóstico de vários tipos de HPVs, permitindo assim, segundo a autora “um sistema pioneiro para detecção portátil desse vírus.”

3.4. BIOSSENSORES APLICADOS AO ESTUDO DO CÂNCER

O câncer é uma doença que abrange mais de 100 diferentes tipos de doenças malignas tendo em comum o crescimento desordenado de células que atingem tecidos adjacentes ou órgãos a distância segundo INCA. O crescimento desordenado das células que ocorrem em nosso organismo pode ser causado por diversos fatores, como anomalias genéticas, exposição às radiações ionizantes e hábitos de vida. Os cânceres de mama e de próstata são os menos letais e com alta taxa de incidência, a baixa mortalidade deve-se à infraestrutura e campanhas de conscientização popular disponibilizadas pelos hospitais públicos e particulares. Para diagnosticar o câncer, os exames utilizam procedimentos invasivos e exames imunológicos, que são demorados e de alto custo. Logo, é necessário desenvolver tecnologias que sejam baratas, de fácil detecção e que possa ser utilizada para diagnosticar e orientar acerca do tratamento a ser aplicado, facilitando no tratamento logo no estágio inicial da doença, (SOARES, 2017). O câncer é um processo complexo que envolve diversos fatores para seu crescimento e que possui uma taxa de sobrevivência baixa. Os biossensores são ferramentas que reconhecem os biomarcadores e propiciam um diagnóstico e prognóstico precoce dessa doença, eles representam uma parte da biotecnologia revolucionária para a humanidade, a sua efetividade e tratamento são importantes para detectar o câncer em estágios precoces. Os biossensores representam um avanço na medicina por serem uma maneira de detectar o câncer precocemente de forma menos invasiva e de aumentar a taxa de sobrevida.

Sendo o câncer uma doença multifatorial, esta inclui o crescimento desordenado de células tumorais em diversos estágios representando a segunda maior causa de mortes globalmente. Atualmente estão registrados mais de 200 tipos de câncer (BOHUNICKY E MOUSA, 2011).

O câncer pode ser causado por uma gama de fatores genéticos ou ambientais, entre eles pode-se citar a exposição à radiação carcinogênica e a exposição a patógenos como bactérias e vírus. A fisiopatologia do câncer é um processo complexo, o qual envolve o crescimento desordenado das células resultando na formação de uma massa tumoral que se torna independente de processos homeostáticos. Esse processo inclui a promoção da sinalização de proliferação, o escape de supressores de crescimento, a resistência dessas células à apoptose, o desencadeamento da angiogênese e a ativação do processo de invasão e de metástase, conforme BOHUNICKY E MOUSA (2011); ALTINTAS E TOTHILL, (2015).

As células malignas produzem substâncias biológicas e essas podem ser detectadas tanto nas próprias células tumorais como, também, no sangue, na urina ou em outros fluidos corporais, esses marcadores se encontram super expressos devido ao aparecimento e crescimento do câncer. (NAZARETH *et al*., 2023). Essas substâncias ao serem dosadas podem ser utilizadas para a detecção do câncer e são chamadas de biomarcadores (ALTINTAS E TOTHILL, 2015).

Um biossensor é definido como um equipamento bioanalítico que está associado ao reconhecimento molecular de biomarcadores e integrado com um transdutor físico-

químico responsável por traduzir o sinal biológico em um sinal elétrico. Os biossensores podem ser ópticos, eletromecânicos, termométricos, piezoelétricos ou magnéticos (NAZARETH *et al*., 2023). Os biossensores são classificados como equipamentos *point-of-care*, que são sistemas de fácil utilização para realização de testes junto ao paciente. Além disso, esses dispositivos são rápidos, robustos e apresentam uma capacidade de teste multianalítica, de acordo com TOTHILL, (2009).

Os biossensores foram desenvolvidos com bases em elementos de reconhecimento biológicos, como antígenos e anticorpos, com o intuito de serem dispositivos portáteis e baratos. Hoje em dia no campo da biologia molecular acompanhamos avanços significativos no uso de biossensores para diagnóstico e prevenção de doenças. (ANDRADE, 2017). Os biossensores podem ser definidos como um dispositivo especial bioeletrônico comumente usados em bioanálise, no qual pode ser um dispositivo compacto analítico que incorpora um sensor biológico, sendo ele biologicamente derivado integrado ou intimamente associados a um transdutor físico-químico. O objetivo é de detectar um "reconhecimento biológico/molecular" e transformar em outro tipo de sinal utilizando um transdutor. Portanto, um biossensor terá de apresentar três componentes básicos conectados em série: um biorreceptor, um transdutor e um sistema de processamento de sinal. O funcionamento básico dos biossensores envolve a interação entre a camada ativa e analito; esse vai gerar um sinal mensurável captado pelo transdutor, seguido pela amplificação do sinal e processamento dos dados. Esse processo genérico dos biossensores faz com que seja possível empregar diversas técnicas de detecção de acordo com o transdutor utilizado. Estas técnicas podem ser, eletroquímicas, elétricas, gravimétricas e ópticas.

O câncer de próstata ataca uma glândula localizada na região pélvica, em frente ao reto e sob a bexiga urinária. A função da próstata é a produção do líquido que irá nutrir e proteger os espermatozoides. Não se sabe exatamente a causa do desenvolvimento desse câncer, porém acredita-se que é relacionado ao nível dos hormônios ou alterações no DNA herdados ou adquirido. O jeito convencional para diagnosticá-lo é através de vários exames, porém com os avanços tecnológicos o diagnóstico deste câncer poderá ser feito através de sensores eletroquímicos. Estes atuam no reconhecimento molecular bioquímico a partir de interações seletivas com o material biológico analisado. A escolha desse dispositivo tem como base o fato de ser econômico, simples, preciso e sensível para o diagnóstico do paciente. (LIMA JÚNIOR, 2022) No estudo deste autor, a pergunta principal é como o desenvolvimento de biossensores eletroquímicos pode contribuir para o diagnóstico precoce do câncer de próstata.

Sabemos que biossensores são equipamentos analíticos que vão combinar a atividade seletiva de um elemento de reconhecimento biológico, que interage com a substância de interesse, e um transdutor que converte o sinal biológico em sinal mensurável. Ou seja, tem a finalidade de produzir um sinal elétrico que seja proporcional em magnitude ou frequência à concentração do analito. (SOARES, 2017) Um biossensor, de forma básica tem a seguinte disposição, a entrada do analito na biocamada, que inclui o elemento biorreceptor, e será imobilizada no substrato do biossensor. Seus biorreceptores podem ser enzimas, micróbios, organelas, células ou tecidos de animais ou plantas, anticorpos, receptores, ácidos nucléicos, entre outros. O analito contido na amostra fluídica ou sólida, ao entrar em contato com o biorreceptor, imobilizado na superfície do biossensor, produz uma mudança físico-química, que pode ser identificada por um transdutor elétrico. Com o sinal elétrico o sistema processa a informação e informa ao usuário se o analito foi ou não detectado e informa a quantidade de analito na amostra. b primeiro biossensor foi

proposto em 1962 e a partir disso foram desenvolvidos vários estudos e aplicações. Em 2007, foram investidos 10,7 bilhões de dólares na pesquisa e desenvolvimento de biossensores para várias aplicações. Estima-se um crescimento de 10,4% anual no mercado de biossensores. Sua popularidade e aceitação em diversas áreas deve-se as vantagens que esse dispositivo oferece, como menor tempo de processamento e análise da amostra, além da possibilidade de integração em um único encapsulamento e de análise em tempo real e no local de medição, além de ser um método mais barato comparado a outros. O biossensor de maior no diagnóstico do câncer de próstata é do tipo eletroquímico. Os biossensores eletroquímicos são os mais comuns, por serem simples, precisos e de alta sensibilidade (SOARES,2017). São compostos de um elemento biológico que vai reconhecer o analito alvo e pelo transdutor que vai fazer um biorreconhecimento em um sinal elétrico. Na detecção do marcador PSA (antígeno prostático específico) são usadas técnicas de biossensores baseadas em aptâmeros, peptídeos, reações enzimáticas, luminescência, anticorpos, nanocorpos e biopolímeros.

O *National Cancer Institute* (NCI) define um biomarcador como "uma molécula biológica encontrada no sangue, outros fluidos corporais ou tecidos que é um sinal de um processo normal ou anormal ou de uma condição ou doença. Um biomarcador pode ser usado para ver como o corpo responde a um tratamento para uma doença ou condição". Os biomarcadores podem ser de várias origens moleculares, incluindo DNA (ou seja, mutação específica, translocação, amplificação e perda de heterozigosidade), RNA ou proteína (ou seja, hormônio, anticorpo, oncogene ou supressor de tumor). Biomarcadores de câncer são potencialmente uma das ferramentas mais valiosas para a detecção precoce do câncer, estadiamento e pré-tratamento preciso, determinando a resposta do câncer ao tratamento quimioterápico e monitoramento da progressão da doença. (BASIL *et al.*, 2006). Os biomarcadores são normalmente detectados em fluidos humanos, como sangue, soro, urina ou no líquido cefalorraquidiano (fluido cerebrospinal ou líquor, é um fluido corporal estéril e de aparência clara que ocupa o espaço entre o crânio e o córtex cerebral) mas também pode estar presente nas células tumorais, (BOHUNICKY e MOUSA, 2011). Os principais biomarcadores de câncer são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – Biomarcadores comuns utilizados para detecção de câncer

Tipo de Câncer	Biomarcador
Mama	BRCA1, BRCA2, CA I5-3, CA 125, CA 27.29, CEA NY-BR-I, ING-I, HER2/NEU, ER/PR
Cólon	CEA, EGF, p53
Esofágico	SCC
Fígado	AFP, CEA
Pulmão	CEA, CA 19-9, SCC, NSE, NY-ESO-I
Melanoma	Tyrosinase, NY-ESO-I
Ovários	CA 125, HCG p53, CEA, CA 549, CASA, CA 19-9, CA 15-3, MCA, MOV-I, TAG72
Próstata	PSA

(adaptado de BOHUNICKY e MOUSA, 2011, p.3)

Um biossensor é um dispositivo usado para detectar um analito biológico, seja de origem ambiental ou biológica (ou seja, dentro do corpo humano). Informações como se o analito está presente e em que nível é transduzido em um sinal elétrico que pode ser amplificado, exibido e analisado. Exemplos de analitos incluem proteínas (antígeno, anticorpo e

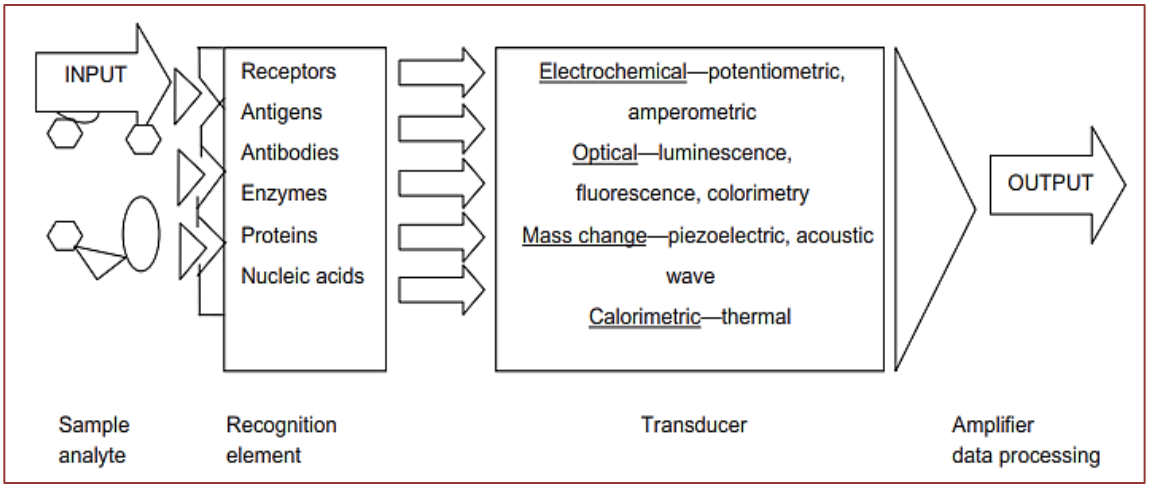
enzima), ácido nucleico ou outro agente biológico ou componente metabólico (ou seja, glicose).

Na medicina, os biossensores podem ser usados para monitorar os níveis de glicose no sangue em diabéticos, detectar patógenos e diagnosticar e monitorar o câncer. A visão do futuro para biossensores inclui até mesmo dispositivos em escala de chip colocados no corpo humano para monitorar sinais vitais, corrigir anormalidades ou mesmo sinalizar um pedido de ajuda em uma emergência. Em teoria, as aplicações dos biossensores são ilimitadas.

Em termos de câncer, o analito detectado pelo biossensor é um biomarcador tumoral. Assim, ao medir os níveis de certas proteínas expressas e/ou secretadas por células tumorais, os biossensores estão sendo utilizados para a detecção e monitorização do câncer pois ao detectarem esses biomarcadores tumorais, esses dispositivos serão capazes de identificar onde o tumor está presente, se o tumor é benigno ou maligno, e se o tratamento está sendo eficiente em eliminar ou reduzir as células cancerígenas.

Biossensores que podem detectar múltiplos analitos podem ser particularmente úteis no diagnóstico e acompanhamento do câncer, uma vez que a maioria dos tipos de câncer envolvem vários biomarcadores. A capacidade do biossensor de testar vários biomarcadores ao mesmo tempo melhora a capacidade de diagnóstico do câncer e, também, poupa tempo e recursos financeiros. (BOHUNICKY E MOUSA, 2011). A utilidade de qualquer plataforma de biossensor depende intimamente da viabilidade do(s) biomarcador(es) para produzir diagnósticos com alta confiança. Em particular, os biomarcadores devem não apenas sinalizar a presença de um tumor ou câncer, mas também prever a fase da tumorigênese (SOPER *et al*, 2006). A estrutura básica e a função de um biossensor são mostradas na Figura 5.

Figura 5 – Descrição de como funciona um Biossensor



Fonte: (BOHUNICKY E MOUSA 2011, p. 5).

Um biossensor é composto por três componentes: um elemento de reconhecimento, um transdutor de sinal e um processador de sinal que transmite e exibe os resultados. O componente de reconhecimento molecular detecta um 'sinal' do ambiente na forma de um analito, e o transdutor então converte o sinal biológico em uma saída elétrica.

3.4.1. TIPOS DE BIOSSENSORES USADOS EM DETECÇÃO DE CÂNCER

Um elemento de reconhecimento molecular pode ser conectado a um número de diferentes transdutores de sinal. O transdutor converte o sinal molecular em um sinal elétrico ou digital que pode ser quantificado, exibido e analisado. Os transdutores se enquadram em quatro categorias gerais: eletroquímicos (amperométricos e potenciométricos), ópticos (colorimétricos, fluorescentes, luminescentes e interferométricos), baseados em massa (ondas piezoelétricas e acústicas) e calorimétricos (baseados em temperatura), conforme TOTHILL *et al.*, 2003. A seguir serão descritos alguns destes tipos.

3.4.1.1. BIOSSENSORES ELETROQUÍMICOS

Os biossensores eletroquímicos são o tipo mais comum de biossensor em uso atualmente devido à sua portabilidade, custo-benefício, tamanho pequeno e facilidade de uso. Podem ser usados em casa ou no consultório médico como dispositivos de ponto de atendimento (POC). Um exemplo deste biossensor é o sensor de glicose, que revolucionou a forma como as leituras de glicose no sangue são feitas e registradas.

Os biossensores potenciométricos e amperométricos são os dois tipos mais comuns de biossensores eletroquímicos. Os biossensores potenciométricos usam eletrodos seletivos de íons para detectar uma resposta elétrica no elemento de reconhecimento molecular.

Ainda não está em uso clínico, mas se mostra uma grande promessa na área de detecção de câncer, é o sensor potenciométrico endereçável à luz (LAPS) que é acoplado a um elemento de reconhecimento de fago. O fago-LAPS foi capaz de detectar o biomarcador de câncer hPRL-3 e células cancerígenas (MDA/MB231 linha celular de câncer de mama) com alta sensibilidade. Este novo biossensor de base potenciométrica foi proposto para uso na detecção clínica de câncer e avaliação de drogas anticancerígenas.

Os biossensores eletroquímicos oferecem a capacidade de detectar DNA danificado, bem como os carcinógenos que causaram o dano. A tecnologia de transdutores eletroquímicos também é amplamente usada em imunoensaios e arranjos de proteínas. Imunossensores, nos quais um anticorpo é acoplado a um transdutor eletroquímico, também têm sido usados para medir biomarcadores de câncer (BOHUNICKY e MOUSA, 2011).

3.4.1.2. BIOSSENSORES ÓPTICOS

Biossensores ópticos são sensores baseados em luz que medem mudanças em comprimentos de onda específicos de luz. O transdutor pode ser baseado em luminescência, fluorescência, colorimétrico ou interferométrico.

Os transdutores ópticos convertem mudanças nos comprimentos de onda ou SPR em resposta ao reconhecimento do analito em uma leitura elétrica/digital. Os biossensores de cristal fotônico são uma classe emergente de biossensores que usam um transdutor óptico. O sensor de cristal fotônico é projetado para capturar luz de áreas ou volumes muito pequenos, permitindo maior sensibilidade de medição e, em seguida, transmitir essa luz para um alto campo eletromagnético para exibição.

Um exemplo interessante dessa aplicação desse tipo de tecnologia à detecção de câncer é o biossensor óptico baseado em fluorescência a laser esofágico para o diagnóstico e monitoramento de cânceres de garganta. Após ser engolido pelo paciente, o aparelho direciona um feixe de laser que emite um comprimento de onda de luz específico na superfície do esôfago. A parede do esôfago reflete a luz em comprimentos de onda muito específicos, dependendo se o tecido contém células cancerígenas ou células normais. Esse sensor foi testado em mais de 200 pacientes e descobriu-se que diagnostica com precisão o câncer em mais de 98% das vezes. Ao usar esse tipo de biossensor, as biópsias cirúrgicas e a dor e o tempo de recuperação associados a elas podem ser evitados, (BOHUNICKY e MOUSA, 2011).

3.4.1.3. BIOSSENSORES BASEADOS EM MASSA

Em termos de detecção de câncer, biossensores piezoelétricos são mais comumente usados. Os biossensores piezoelétricos e de ondas acústicas compõem a classe dos biossensores baseados em massa. Os sensores piezoelétricos são baseados em mudanças na massa dos cristais de quartzo quando a energia potencial é aplicada a eles. Essa mudança na massa gera uma frequência, que pode ser convertida em um sinal.

Imunosensores e sensores de microcantilever que usam tecnologia piezoelétrica provaram ser úteis na identificação de biomarcadores de câncer segundo Tothill, (2009). Um estudo conduzido por DELL'ATTI *et al* (2006) ilustrou o uso de um biossensor piezoelétrico acoplado à amplificação de PCR para detectar mutações pontuais no gene p53 humano, que estão subjacentes em parte a quase todos os tipos de câncer.

Como as mutações do p53 são críticas para o desenvolvimento do câncer e a eficácia dos tratamentos contra o câncer, tem havido um esforço considerável no desenvolvimento de maneiras rápidas, baratas e eficazes de detectar mutações do p53. (TOTHILL *et al*, 2009).

3.4.1.4. BIOSSENSORES CALORIMÉTRICOS

Os biossensores calorimétricos são menos comuns do que outros biossensores para diagnóstico de câncer, mas a introdução da nanotecnologia no campo dos biossensores aumentou a gama de aplicações para esses tipos de biossensores.

Os biossensores calorimétricos medem reações exotérmicas. Muitas reações enzimáticas geram calor, e mudanças no calor podem ser usadas para medir a concentração do analito. A reação é monitorada medindo as mudanças de entalpia, que indiretamente fornecem informações sobre a concentração do substrato, (SOPER *et al*, 2009).

Um relatório recente de MEDLEY *et al* (2009) demonstrou o uso de um biossensor calorimétrico de nanopartículas de ouro baseado em aptâmeros para a detecção de câncer. Os pesquisadores conseguiram, usando as nanopartículas de ouro, diferenciar dois tipos diferentes de células, células de leucemia aguda e células de linfoma de Burkitt. Este relatório ilustra a viabilidade de combinar elementos de reconhecimento baseados em aptâmeros com um transdutor calorimétrico para detectar células cancerígenas e potencialmente discriminar entre células normais e cancerígenas. (BOHUNICKY e MOUSA, 2011).

3.5. BIOSSENSORES E NANOTECNOLOGIA

A nanotecnologia é um campo emergente que está tendo um enorme impacto nos biossensores e, por extensão, no diagnóstico, prognóstico e monitoramento do câncer. A maioria dos cânceres é diagnosticada somente após a metástase, tornando-o muito mais mortal e de difícil tratamento. Cerca de 60% dos casos de câncer são diagnosticados em pacientes após o tumor ter metástase.

A aplicação da nanotecnologia ao desenvolvimento de biossensores aumenta as chances de detectar o câncer mais precocemente, melhorando assim as taxas de sobrevida dos pacientes.

Um exemplo disso é o diagnóstico de câncer por ressonância magnética (MRI), uma das tecnologias de imagem mais comuns em uso hoje para diagnóstico e monitoramento de câncer. Uma grande desvantagem da ressonância magnética é que ela não pode detectar entidades menores que alguns centímetros. O uso de nanomateriais como agentes de imagem permite uma medição mais sensível e precisa dos tecidos cancerosos. Lipossomas, dendrímeros, *buckyballs* (ou fulerenos que são moléculas em forma de bola de futebol que consiste de 60 átomos de carbono ligados) e nanotubos de carbono são exemplos de nanomateriais que têm sido usados para melhorar a imagem do câncer. Além disso, o uso da nanotecnologia significa sensores menores, o que se traduz em melhor acesso e detecção de marcadores de câncer, bem como ou aprimoramentos de sinais poderosos e específicos, custo reduzido e detecção de alto rendimento (BOHUNICKY e MOUSA, 2011).

3.6. DESAFIOS PARA IMPLANTAÇÃO NO MERCADO

Embora os biossensores de câncer tenham inúmeras vantagens, existem alguns desafios relacionados a eles. A maioria dos biossensores de câncer mostra estabilidade reduzida devido à falta de biocompatibilidade das matrizes de imobilização utilizadas para fabricá-las. Além disso, frequentemente fracos sinais biológicos gerados pela interação molecular de biorecognição-biomarcador podem levar a sensibilidade reduzida de detecção.

O maior desafio é o alto grau de complexidade da célula cancerígena, onde um biomarcador pode estar envolvido em vários processos celulares. Portanto, uma melhor compreensão das alterações moleculares subjacentes a progressão do câncer é um pré-requisito para sua implantação no mercado. Os principais gargalos na comercialização de biossensores de câncer são melhores sensibilidade, seletividade, análise em tempo real em relação custo-benefício.

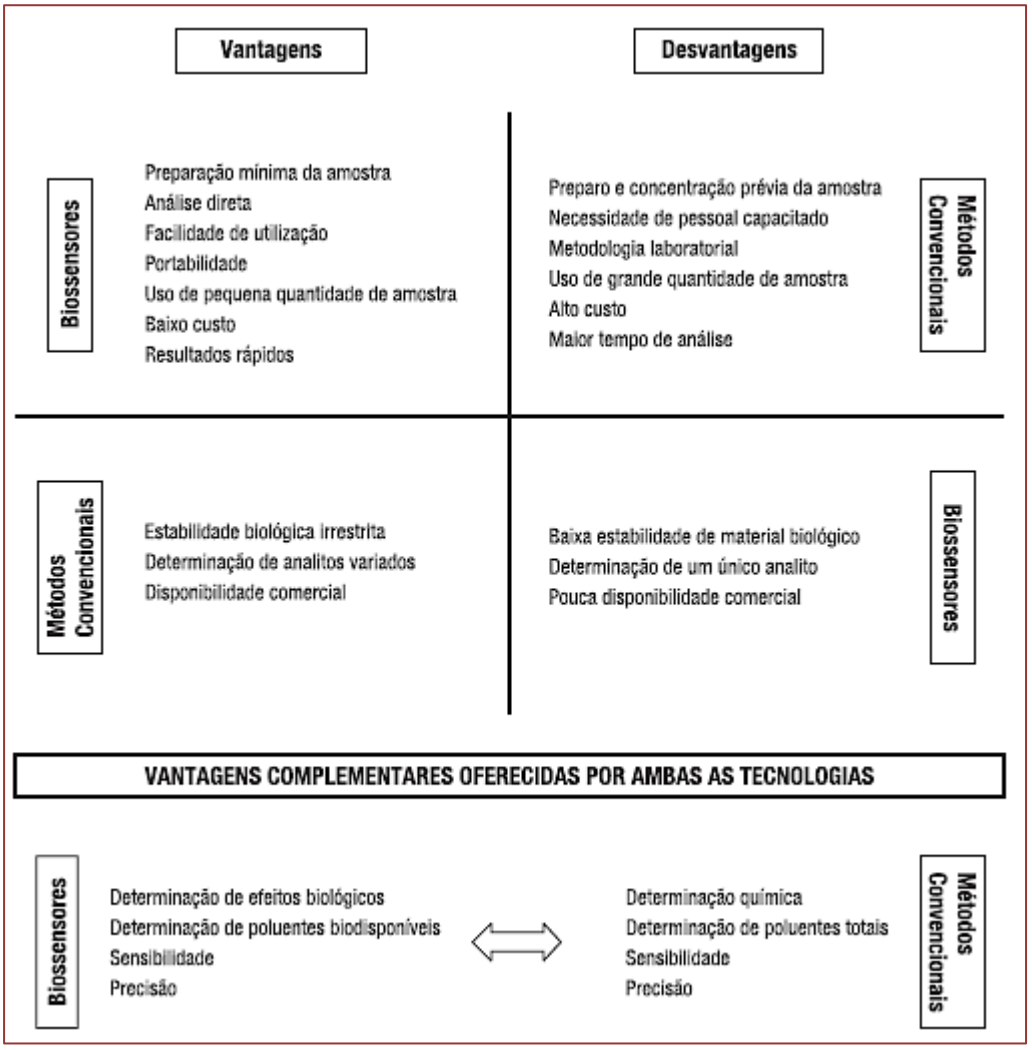
Outro desafio para a inserção no mercado, é a baixa concentração de biomarcadores no soro ou na urina, o que cobra dos biossensores para o diagnóstico do câncer uma elevada apreciação. Além disso, os custos fixos e operacionais devem ser os menores possíveis, a fim de que os biossensores sejam colocados na configuração POC. Outro fator a ser analisado, é a cautela com as tecnologias de triagem, pois elas não devem ser baratas, apresentar grande confiabilidades e não apresentar falhas. (SOPER *et al*, 2006).

4. BIOSSENSORES NO MONITORAMENTO AMBIENTAL

Os biossensores possuem grande potencial para serem aplicados na área ambiental, em métodos de detecção de contaminantes químicos e biológicos de alta sensibilidade e baixo custo, capazes de fornecer resposta analítica em tempo real. (FURTADO *et al*., 2008). Atualmente, os efluentes gerados são coletados por estações de tratamento, e após encontrar-se em condições adequadas, podem ser liberados em águas de superfície, como lagos ou riachos, assim como, em estações de purificação de água potável. O tratamento de efluentes pode utilizar processos físicos, químicos e biológicos, a fim de remover ou neutralizar os contaminantes. (MADIGAN *et al*., 2016). Tendo como objetivo baixar e atender à crescente demanda na necessidade de monitoramento, foram desenvolvidos microrganismos de células inteiras (WCBs). Nesse modelo os genes podem ser regulados por fatores de transcrisção alostéricos (aTFs), os quais possuem especificidade a um componente químico em análise, e a resposta resultante da interação é um sinal detectável. Fazendo uma mudança no fator de transcrição possibilita os sistemas celulares serem programados para detectar diferentes tipos de contaminantes (VAN DER MEER e BELKIN, 2010). Os benefícios nessa abordagem são o acréscimo na resposta através da expressão gênica e objetividade quanto a metodologia que pode ser direcionada para a biodisponibilidade de um composto (McNERNEY, 2020).

No monitoramento ambiental os bioanalizadores são ideais, pois podem inferir uma resposta específica até mesmo em tipos complexos de analito não necessitando um tratamento antecipado da amostra e com isso se ganha tempo. Dessa forma respostas imediatas podem ser relevantes no objetivo de mitigar um dano corrente. Entre os atributos essenciais dos biossensores pode se destacar a especificidade e a sensibilidade, sua simplicidade e análises rápidas além do baixo custo e precaução (Figura 6, RASSAEI *et al*., 2011), ser possível o seu reuso, e devem ser imunes ao pH e temperatura (CHEN *et al*.,2019).

Figura 6 - Comparação das características dos biossensores em relação aos métodos analíticos tradicionais



Fonte: (adaptado de RODRIGUEZ-MOZAZ *et al.*, 2004).

4.1. TÉCNICAS CONVENCIONAIS DE DETECÇÃO DE BACTÉRIAS

A detecção de microrganismos tem sido realizada através de meios de cultura, desde sua descoberta na década de 1660 (RUOSS e WYNN, 2019). Esses métodos de identificação baseiam-se nas características químicas dos patógenos e sua capacidade de serem cultivadas em ambiente artificial, pois dependem de um sistema biológico único (RAY *et al.*, 2017). Para fornecer a evidência necessária ao entendimento desse sistema, a relação entre doenças e seus agentes causadores é observada acerca de métodos que incluem sorologia, testes bioquímicos e os mais recentes testes moleculares (FANG e RAMASAMY, 2015). Em comparação com métodos convencionais, os biossensores possuem as seguintes vantagens: preparação mínima da amostra, facilidade de utilização e portabilidade, uso de pequena quantidade de amostra e resultados rápidos. Já métodos convencionais possuem a desvantagem de exigirem preparo prévio da amostra e normalmente em grande quantidade, maiores custos e maior tempo de análise. Em contrapartida, métodos convencionais possuem maior disponibilidade comercial e se prestam à determinação ode variados analitos, ao passo que biossensores possuem pouca

disponibilidade comercial, prestam-se normalmente à determinação de um único analito por vez e o material biológico é pouco estável. Ambas as tecnologias possuem vantagens complementares: são precisas e possuem elevada sensibilidade, sendo uma para efeitos biológicos e outra para efeitos químicos. No entanto, essas técnicas são adequadas apenas para os patógenos que são cultiváveis. Portanto, nossa compreensão da diversidade e fisiologia das comunidades microbianas foi limitada a apenas cerca de 1% de toda a comunidade microbiana (MARTINY, 2019). Os níveis de sensibilidade e o tempo de resposta das técnicas convencionais usadas para a detecção de patógenos bacterianos em diferentes matrizes apontam uma lacuna quanto à configuração das diferentes técnicas baseadas em cultura para detecção microbiana. Com base em seus limites de detecção, as técnicas de culturas não são adequadas para o diagnóstico rápido de patógenos em alimentos, água ou ao controle ambiental.

4.2. SEGURANÇA ALIMENTAR

A preocupação com a qualidade e expectativa de vida tem sido um fator cada vez mais importante na sociedade e a procedência dos alimentos é parâmetro de qualidade. Nas análises de qualidade dos alimentos, os biossensores têm sido aplicados principalmente na detecção de compostos químicos e biológicos. Logo, a análise da composição dos alimentos com o uso dos biossensores permite a quantificação desses componentes que são encontrados naturalmente e aqueles que são adicionados para o seu enriquecimento, como algumas vitaminas e minerais. (FURTADO, 2008).

A maioria dos patógenos de veiculação hídrica, ou doenças diretamente relacionadas a poluição ambiental, podem ser prontamente identificados com uma avaliação adequada. Nesse contexto, biossensores são desenvolvidos para monitorar a contaminação de patógenos na água e são capazes de detectar não apenas patógenos cultiváveis, mas também detectar a ocorrência de microrganismos viáveis, mas não cultiváveis, bem como a presença de patógenos em biofilmes. (RAMÍREZ-CASTILLO, 2015).

A *Escherichia coli* é umas das bactérias controladas nos setores hospitalar e alimentício. A falta de controle deste microrganismo pode desencadear o surgimento de doenças no organismo humano, que ocorrem, muitas vezes, pelo consumo de água contaminada ou falta de higienização dos setores. Uma rápida detecção e quantificação é requerida nos ambientes que possuem controle de patógenos e métodos mais rápidos são necessários (LIU *et al*., 2013).

4.3. SANEAMENTO BÁSICO

O fósforo é um nutriente essencial para a vida humana, vegetal e animal. No entanto, possui característica limitante ao crescimento, o que o torna um parâmetro importante para monitorar na água, onde níveis elevados podem dar origem à proliferação de algas. Como o fosfato não pode ser medido diretamente na água, é necessário um método de detecção baseado em reagentes. (THÉVENOT, 2013). Na tentativa de fabricar um sistema integrado ao sistema analítico de amostras para adaptar a resposta em um único dispositivo, obteve-se o surgimento dos sensores microfluídicos. Seu sucesso refere-se a sensores analíticos que podem executar rapidamente, em um ou vários laboratórios, operações em um chip portátil. Também conhecido como *Lab-on-a-chip* (LOC).

Uma característica distintiva do LOC é que ele permite a manipulação de quantidades muito pequenas de fluido, ainda menores que a escala de picolitros (COLE *et al*., 2017). Todos os protocolos de diagnóstico envolvidos em laboratórios padrão desde a preparação da amostra até o estágio de resultado estão submetidos no dispositivo (YANG et al., 2017), desta forma, tornando-o relevante em países com média e baixa renda. Também se mostra relevante nesses locais em termos de custo, transporte e armazenamento. As pesquisas feitas no campo mostram que a redução da área de sensores analíticos poderia aumentar a sensibilidade do sensor enquanto reduz o tempo de resposta do ensaio (LAI et al., 2016), assim, a presença de canais microfluídicos em um dispositivo LOC aumentará a eficiência, precisão e sensibilidade do dispositivo. Três etapas estão envolvidas no ponto de cuidado e elas são a preparação da amostra, análise da amostra e interpretação dos resultados.

4.4. MONITORAMENTO AMBIENTAL

Todos os anos, centenas de substâncias químicas têm sido liberadas no meio ambiente, sem conhecimento dos seus possíveis efeitos tóxicos para saúde humana e ambiental. Por esse motivo, é de extrema importância o contínuo desenvolvimento de novas técnicas analíticas capazes de avaliar os riscos relacionados à liberação desses contaminantes no ambiente e à exposição humana (SORENSEN et al., 2003). Neste contexto, a tecnologia dos biossensores surge como uma abordagem promissora. As diversas aplicações dos biossensores, com ênfase para o monitoramento de poluentes ambientais perigosos para a saúde humana (ex.: pesticidas, metais, fenol, nitrito, disruptores endócrinos, etc.) (RON, 2007) garantem maior eficiência e respostas mais confiáveis no controle ambiental. Além de possuir diversas características que fazem o uso para o monitoramento ambiental de poluentes mais vantajoso em relação a outras técnicas, os biossensores complementam os métodos analíticos tradicionais, gerando novas informações que são fundamentais para avaliação do risco de poluentes (MARCO & BARCELÓ, 1996).

As principais características que diferenciam os biossensores dos outros métodos tradicionais (químicos e bioensaios), implicam em múltiplas configurações e modelos. Essas variações têm sido desenvolvidas por pesquisadores de diversas áreas da ciência e uma definição adequada para esta nova classe de sistemas analíticos. (NARESH, 2021).

4.5. CLASSES DE BIOSSENSORES PARA MONITORAMENTO AMBIENTAL

Os primeiros passos na construção de um biossensor já dado utilizando dois mecanismos de identificação (SEKLI BELAÏDI *et al*., 2019), utilizando dois sistemas de detecção, eletroquímica e óptica amparado em resultados distintos em algas, nele ficou demonstrado perspectivas para detecção de pesticidas em amostras de água. Uma abordagem a ser considerada é quanto a viabilidade na utilização desse princípio de análise para identificação simultânea de diferentes poluentes. Nesse sentido já foram realizadas pesquisas que obtiveram sucesso. RAYMUNDO-PEREIRA *et al*., 2019, demonstraram a perspectiva de usar eletrodos de carbono serigrafados para determinação simultânea de estradiol, paracetamol e hidroquinona em água de torneira. Outro estudo empregando um sensor luminescente oriundo de uma disposição metal-orgânica de európio(III) estável, foi empregado objetivando a identificação de antibióticos (LI *et al*.,2022).

Existem diferentes modos de classificação dos biossensores. Uma delas é de acordo com a conversão de sinal e a outra está amparada ao tipo de receptor biológico (ALFAYA e KUBOTA, 2002). Estes consistem em: biossensores de conversão de sinal, receptores biológicos, enzimáticos, células inteiras, anticorpos, à base de aptâmeros, de DNA e biomiméticos. Nos tópicos que seguem serão descritos brevemente cada um destes tipos de biossensores.

4.5.1. BIOSSENSORES DE CONVERSÃO DE SINAL

Essa forma de classificação é dividida em quatro grupos e esse método se baseia na forma de conversão de sinal, eletroquímicos, ópticos, piezoelétricos e termométricos (RODRIGUEZ-MOZAZ *et al*., 2004). Nos biossensores eletroquímicos medem-se na corrente ou potencial entre o receptor e a amostra, possui alta sensibilidade nos eletrodos amperométricos ou potenciométricos, utilização destes em novas engenharias de microtecnologia, o que os torna baratos e compactos facilitando a portabilidade e custo baixo. Os bioanalisadores ópticos captam a variação de luz absorção ou produção, que acontece entre o receptor biológico e o material em análise, muito empregado na identificação de contaminantes, drogas e substâncias tóxicas ou agentes insalubres, seu emprego é agilizado e possui capacidade de realizar experimentos simultâneos (LAZCKA *et al*., 2007). Outro modelo são os biossensores que realizam a aferição de massa do analito são os piezoelétricos, nesse modelo ocorre uma reação receptor biológico com o analito, resultando num ganho de massa do receptor. Nesse tipo de biossensor, o uso de receptores é de pequenas proporções assim como a quantidade de amostra, em relação a outros modelos utilizados, assim como o limiar de identificação reduzido, a vantagem que permite avaliações em tempo real do ar ou amostras em estado líquido. E finalmente os biossensores termométricos, seu modo de detecção se dá através da alteração na temperatura, devido às interações que ocorrem entre o analito e receptor, área principal de aplicação em sistemas de manufatura e campo medicinal, na área ambiental existem novos avanços na detecção de pesticidas que produzem calor (RODRIGUEZ-MOZAZ *et al*., 2004).

4.5.2. BIOSSENSOR DE RECEPTOR BIOLÓGICO

Os bioanalisadores desse modelo são subdivididos em outras duas classes levando em conta o tipo de reação que ocorre no receptor biológico, (biocatálise) que pode ser composto por: enzimas, microrganismos, organelas, células ou partes de tecidos de animais e plantas, o outro modelo é de bioligantes. Este pode ser composto por: anticorpos, ácidos nucléicos, receptores, polímeros biomiméticos artificiais este último apresenta vantagens quanto a estabilidade química e maior capacidade de adsorção (NAKAMURA e KARUBE, 2003; TARLEY, 2005).

4.5.3. BIOSSENSORES ENZIMÁTICOS

As enzimas são estruturas formadas por proteínas cuja função é atuar como catalisadores biológicos, o biossensor enzimático é feito com uma enzima específica a qual realizará e detecção biológica. Ela é agregada a um transdutor que recebe o sinal produzido e transforma em uma resposta estimada a concentração do analito. Esse modelo de equipamento requer que a enzima seja fixada a um eletrodo transdutor e não perca as

características após sua imobilização (RAHIMI e JOSEPH, 2019). Ao imobilizar uma enzima estável é possível utilização do equipamento por repetidas vezes, e pode-se manter um monitoramento contínuo (NGUYEN e KIM, 2017). Os métodos principais para imobilizar as enzimas nos biossensores são listados no quadro 2.

Quadro 2 - Métodos de imobilização enzimática em biossensores

Imobilização de enzimas	Particularidade do método
Adsorção	Simples, baixo custo, menos destrutivo para atividade enzimática, não necessita de reagente adicional.
Microencapsulação	Preserva as integridades estruturais e de atuação das enzimas, devido estar protegido contra condições ambientais.
Armadilha	Confere alta estabilidade às enzimas.
Ligação Cruzada	Eficiência e estabilidade melhoradas de enzimas por ligações cruzadas.
Ligações covalentes	Maior estabilidade enzimática do complexo enzima-suporte.

(NGUYEN e KIM, NGUYEN et al. 2019)

4.5.4. BIOSSENSORES DE CÉLULAS INTEIRAS

Esse tipo de biossensor é na utilização de células inteiras, as quais podem ser naturais ou modificadas geneticamente, as mesmas devem possuir características de interação com o analito a ser estudado, e o resultado dessa interação terá um indício que será detectado e quantificado através do transdutor (CHANG *et al*., 2017). Os biossensores formados por células inteiras possuem maior sensibilidade em relação aos modelos já estabelecidos, e conseguem trabalhar em diferentes condições de operação (BILAL e HAFIZ, 2019), de forma semelhante aos biossensores de enzimas ambos necessitam ser imobilizados ao mecanismo transdutor ou suporte, considerando o meio mais adequado tendo em vista asseverar resistência mecânica, efetividade celular, conservação por período prolongado e manejo seguro (MORASKIE *et al*., 2021).

Com o objetivo de tornar os testes mais práticos, tornando possível o tratamento da água *in loco* os biólogos sintéticos desenvolveram microrganismos para atuar como biossensores (WCBs) (VAN DER MEER e BELKIN, 2010), no qual os genes repórteres podem ser comedidos por fatores de transcrição alostéricos (aTFs) os quais reagem a contaminantes químicos específicos, produzindo um sinal detectável.

Os biossensores de células inteiras apresentam vantagens já apresentadas em relação aos métodos já consagrados, como alta sensibilidade, capacidade de detecção síncrona de diferentes compostos, possibilidade de testes locais e de baixo custo, em contrapartida as desvantagens são: tempo de resposta prolongado, suscetibilidade celular quanto a alterações ambientais (temperatura, pH, etc.) e o tempo de vida celular (BILAL e HAFIZ, 2019; CHANG *et al*., 2017, LIM *et al*., 2015).

4.5.5. BIOSSENSORES DE ANTICORPOS

Os anticorpos ou imunoglobulinas pertencem a um grupo de glicoproteínas fabricadas por células do sistema imunológico com a função de identificar substâncias estranhas e nocivas (antígenos), ao detectar o corpo estranho o anticorpo liga-se a ele formando um complexo anticorpo-antígeno (SHARMA *et al*., 2016; FELIX e ANGNES, 2018; OMIDFAR *et al*., 2013), com capacidade de quantificar por intermédio de um transdutor correspondente às interações entre imunoglobulinas e antígenos.

Como vantagem os imunossensores apresentam maior seletividade quando comparados aos meios analíticos tradicionais, e as reações podem apresentar um resultado em tempo real, como desvantagem na utilização desse meio analítico é quanto a sensibilidade dos anticorpos em relação ao pH, temperatura, tempo necessário no desenvolvimento de reagentes específicos para cada composto (ROGERS, 2006).

4.5.6. BIOSSENSORES À BASE DE APTÂMEROS

Os aptâmeros são formados basicamente de RNA ou através de uma fita simples de DNA, esse último é constituído artificialmente, ambos são considerados “anticorpos químicos” (HUANG *et al*., 2021). Possui tamanho entre 15 e 80 pares de bases, e uma ampla variedade de alvos, com competência de se ligarem a moléculas específicas, desde pequenas estruturas (peptídeos, proteínas, carboidratos, íons metálicos) até células inteiras de vírus e bactérias (WANG *et al*., 2019; MONOSIK, *et al*., 2012).

A seleção dos aptâmeros é realizada em vitro por um processo denominado SELEX, nele primeiramente se prepara uma ampla biblioteca de oligonucletídeos constituídos de diferentes segmentos, e estes são incubadas com moléculas alvo por um período, ao final desse tempo as moléculas que não se ligaram são eluídas por processo de aquecimento ou lavagem, e aquelas que aderiram são amplificadas através da reação em cadeia polimerase (PCR) e repete o processo de amplificação por uns 5-15 ciclos (WANG *et al*.,2019; MONOSSIK *et al*., 2012; WANG *et al*., 2016.).

Comparados com os biossensores de anticorpos as vantagens dos aptâmeros são maior estabilidade quanto ao stress ambiental (pH, temperatura), menor custo, potencial de regeneração, perspectiva de serem transformados em conformidade com as moléculas objetivadas ou serem quimicamente sintetizados (WANG *et al*., 2014; KOMAROVA e KUZNETSOV, 2019).

4.5.7. BIOSSENSORES DE DNA

Os biossensores de DNA são construídos com DNA de fita simples (ss-DNA) como componentes de identificação, com atuação fundamentada em duas proposição: (1) processo de hibridização da fita complementar que esta imobilizada em uma região sensora e um DNA alvo, essa formação de híbridos ocorre através das pontes de hidrogênio de forma natural entre os pares de adenina- timina e citosina-guanina (ASAL *et al*. 2018; KOKKINOS, 2019),(2) troca de estruturas do ss-DNA por moléculas do analito alvo (SAIDUR *et al*., 2017). Essas técnicas provocam diversas mudanças físico-químicas, as quais produzem um sinal específico que pode ser transmutado em uma resposta que pode ser mensurado por um transdutor, óptico ou eletroquímico (BACCHU *et al*., 2021).

A utilização de biossensores de DNA apresenta diversas vantagens como especificidade, precisão, biocompatibilidade, e custo-benefício, podendo ser aplicados em diversas áreas, na investigação de doenças, diagnóstico clínico, controle de alimentos e analises ambiental (BACCHU *et al*., 2021; WANG *et al*., 2022). Muitos estudos demonstraram a eficácia na utilização de biossensores à base de DNA na identificação de metais pesados presente no ambiente (SAIDUR *et al*., 2017 ; WANG *et al*., 2022).

O funcionamento baseia-se no princípio de afinidade dos íons metálicos que se agregam para formar pares ou duplas estáveis com determinadas bases de DNA. Exemplo: o íon mercúrio (Hg^{2+}) une-se seletivamente às bases de timina (T) gerando um duplex T-Hg (ONO e TOGASHI, 2004), de forma semelhante os íons prata (Hg^{+}) realizam reação seletiva com duas bases de citosina (C) formando pares C-Hg^{+}-C gerando estabilidade no DNA duplex (ASAL *et al*., 2018; SAIDUR et al., 2917), estruturas de fita simples de DNA ricos em timina e citosina na presença de íons metálicos podem adquirir estabilidade, a captura dos íons metálicos podem ser identificado e quantificado (SAIDUR *et al*., 2917). O quadro 3 apresenta algumas aplicações para biossensores à base de DNA.

Quadro 3 - Exemplos de biossensores de DNA usado no monitoramento ambiental

Analito	transdutor	Alvo	LOD	Linearidade
Hg2+	eletroquímica	Água da torneira, água do rio	0,05 nM	0,1-200 nM
Pb2+	Fluorescente	Sistemas aquosos	5 nM	0-50 nM
Pb2+	Fluorescente	Água do lago	0,6 nM	2-20 nM
Pesticidas organoflorados	Fluorescente	Água do lago	0,018 µg/L	2-10 µg/L
cinasina	Impedimétrico	água	0,8 nM	4 – 70 nM
Pirazon	Impedimétrico	água	1x10-10M	$5{\cdot}10^{-9}$ - $5{\cdot}10^{-5}$ M
Ligionella pneumophila	Óptica (SPRi)	água	104 UFC/ml	
Vibrio cholerae	Impedimétrico	-	7,41 × 10 − 30 mol L −1	10^{-8} – 10^{-14} M
Escherichia coli	Amperométrico	Solo	100 células/g de solo	
Bacillus thuringiensis	Impedimétrico	-	0,997 × 10 − 12 M	1 pM -1 µM
Ostreopsis cf. *ovata*	Colorimétrico	Plâncton, bentonita	9 pg/µL	-

Fonte: adaptado de GAVRILAS et al. 2022.

4.5.8. BIOSSENSORES BIOMIMÉTICOS

Os biossensores são engenhos analíticos com capacidade de detectar a concentração ou demonstrar a presença de um alvo, através de sondas biomoleculares as quais são oriundas de materiais biológicos ou biomiméticos (que possuem comportamento semelhante ao biológico), realizando interações específicas com o meio ambiente. Esses aparelhos podem ser produzidos de forma a obterem desempenho específico e passível de adequação a ambientes naturais (ARRIAZA-ECHANES *et al.*, 2021).

Para investigação de poluentes ambientais os sensores biomiméticos estão em evolução. Já existem estudos utilizando nanopartículas modificadas (YANG *et al.*, 2020; NASIR *et al.*, 2017; CAO *et al.*, 2020), já foram confeccionados nanocristais de calcogenetos em microrganismos (VENA *et al.*, 2016) e para remoção de fenóis foram elaboradas as nanoenzimas (ZHANG *et al.*, 2020). O quadro 4 resume alguns tipos de biossensores que utilizam a concepção biomimética.

Quadro 4: Biossensores biomiméticos para monitoramento ambiental

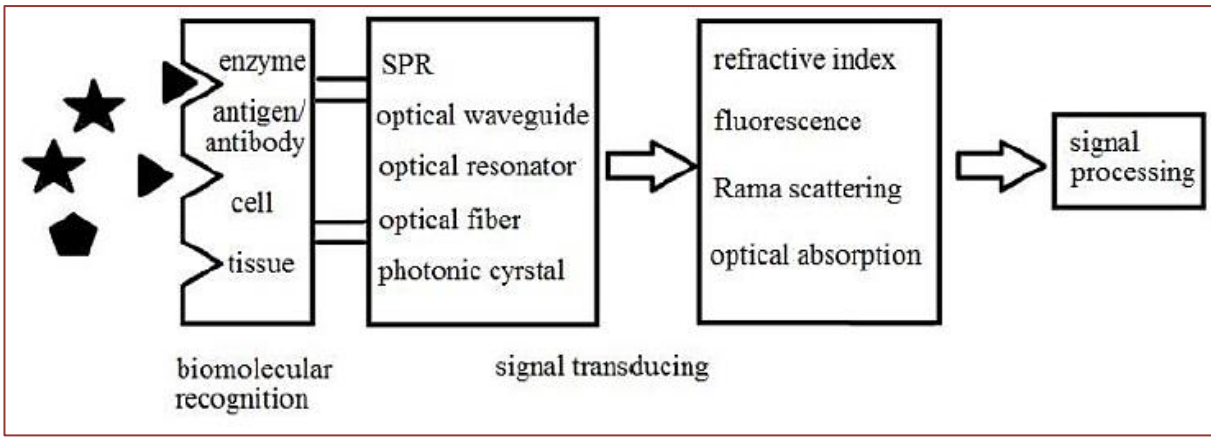
Analito	Estrutura Mimética	Transdutor	Alvo
Metais pesados			
Cu^{2+}, Cr^{3+}, Fe^{3+}, Pb^{2+}, Fe^{2+}, Cd^{2+}, Cr^{6+}, Co^{2+}, Zn^{2+}, Ag^{+}, Al^{3+}	Imobilização de enzimas Nanoflores de fosfatos metálicos-acetilcolinesterase	Colorimétrico	Água
Pb^{2+}	Nanopartículas de ouro com ligante de glutationa	Espectroscópico UV-vis	Água
Hg^{2+}	Partícula ferromagnética decorada com cisteína (Cys-Fe_3O_4)	Colorimétrico	água do rio
Produtos Químicos			
verde de metila	Polímero magnético impresso molecularmente	Voltametria de decapagem anódica adsortiva de onda quadrada	Água de rio, Águas residuais industriais
Inibidores da acetilcolinesterase	Microsensor baseado em 1-fenil-1,2,3-butanotriona 2-oxima (PBO) de microcanal	Potenciométrico	Águas superficiais usadas para abastecimento municipal de água potável
Pesticidas organofosforados	Empregando uma poliacrilamida funcionalizada, poliidroxamicalcanoato	Amperométrico	Abastecimento de água
Toxinas			
Toxinas bacterianas	Microcistinas inseridas em uma matriz polimérica	Potenciométrico	Água

Fonte: adaptado de GAVRILAS et al. 2022.

5. BIOSSENSORES ÓPTICOS

De acordo com, C. Chen e J. Wang (2020) biossensores ópticos são dispositivos capazes de realizar análises através da incorporação de um elemento biológico ao seu sistema. Podem receber sinais elétricos, físicos e químicos, convertendo esses sinais em detecção de biomoléculas. Os biossensores ópticos são compostos por uma unidade de detecção responsável pelo reconhecimento biomolecular, uma unidade transducional responsável por compreender e diferenciar os sinais advindos da unidade de detecção, além também de uma unidade de processamento que recebe os dados da unidade transducional. Conforme mostra a Figura 7, extraída dos autores C. Chen e J. Wang (2020).

Figura 7 – Componentes de um biossensor óptico. Na primeira etapa ocorre o a interação entre moléculas biológicas e ligantes específicos que fazem o reconhecimento de qual tipo de molécula se trata. A segunda etapa consiste na transdução do sinal, que pode ser emitido de variadas formas, como: um guia de ondas, uma onda óptica ou fotônico. Até que o sinal é lido e processado na etapa final

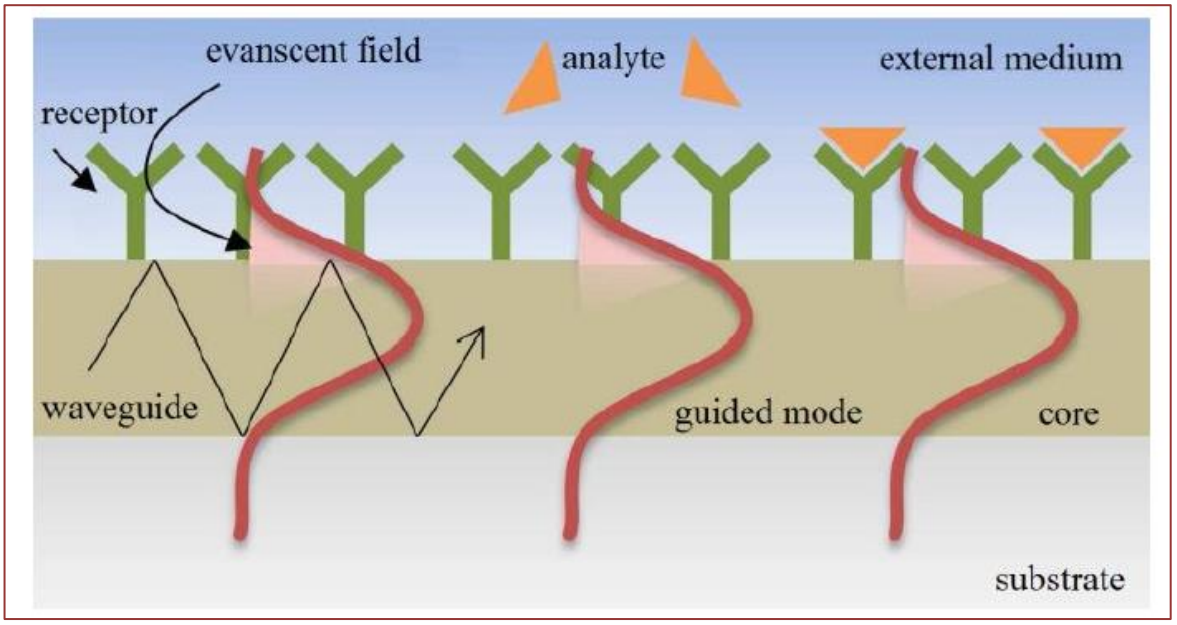


Fonte: extraído de Chen e J. Wang (2020).

Segundo C. Chen e J. Wang (2020), este tipo de biossensor possui algumas vantagens sobre os demais, principalmente por serem menos complexos, e ainda apresentarem um desempenho satisfatório no reconhecimento de sistemas biológicos, ajudando na ascensão de algumas áreas muito importantes, como: descoberta de novos medicamentos, monitoramento de diferentes ambientes e na avaliação de processos alimentares.

Em sua publicação C. Chen e J. Wang (2020), mostraram que os biossensores ópticos utilizam um campo evanescente como meio de detecção dos seus alvos e também do ambiente em si, como mostra a Figura 8. No interior do campo, existem receptores imobilizados em uma camada ligada a um guia de ondas, que recebem a substância ou elemento de interesse, e após a interação entre as duas partes, a onda tem as propriedades da sua orientação alterada, mudando então seu direcionamento.

Figura 8 – Estrutura de um Campo Evanescente: funcionamento simplificado



Fonte: extraído de Chen e J. Wang (2020).

De acordo com PELTOMAA *et al*. (2018), este sistema utilizando campo evanescente conseguiu um grande feito ao restringir as interações tanto de saída quanto de entrada de luz e fluídos para um campo de interação único. Segundo PELTOMAA *et al*. (2018), boa parte dos biossensores necessitam de uma forma de medir a ocorrência do biorreconhecimento, e para tal fato, são utilizados rótulos. Entretanto, os rótulos necessitam estar conjugados ao biorreconhecimento, aumentando uma etapa em todo o processo. Portanto, o êxito de todo a técnica fica limitado ao sucesso da conjugação entre o rótulo e a etapa de biorreconhecimento.

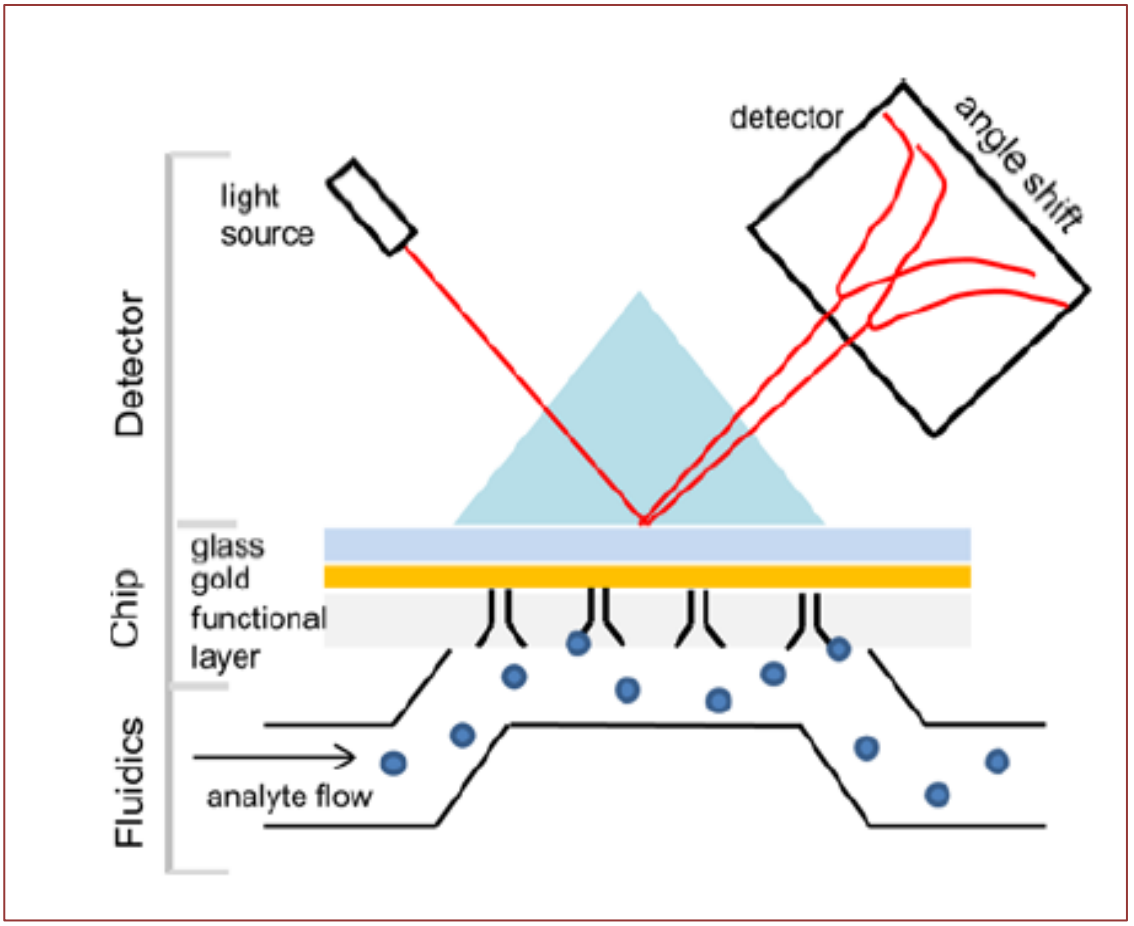
Segue a seguir uma breve explanação dos principais tipos de biossensores ópticos: biossensores de ressonância plasmônica de superfície, biossensores de ressonância plasmônica de superfície localizada, biossensores de fluorescência de onda evanescente, biossensores de fibra óptica bioluminescentes, biossensores de espectroscopia de interferência reflectométrica.

Biossensores de ressonância plasmônica de superfície (sigla em inglês: SPR: *surface plasmon resonance*):

O evento SPR depende de uma superfície condutora, de preferência metálica, localizada na área de interação entre dois meios, usualmente líquido e vidro, além de luz polarizada. Quando a luz atinge a superfície com um determinado ângulo, plasmons superficiais são gerados. Então, de acordo com a massa existente na superfície a intensidade da luminescência refletida em um certo ângulo é diminuída, essa inclinação é também conhecida como ângulo de ressonância. (DAMBORSKÝ *et al*., 2016).

O biossensor com modelo SPR não utiliza rótulos, fazendo então uma detecção objetiva e em tempo real, permitindo a visualização de alterações no sinal de refração na dimensão do sensor. É necessário então que haja uma molécula capaz de interagir com o analito já imobilizada na superfície, um detector óptico, um sensor em forma de chip com uma face de ouro e uma camada capaz de imobilizar a molécula ligante, são as partes mais comuns de um SPR, como podemos ver na Figura 9, extraída de DAMBORSKÝ *et al.*, (2016).

Figura 9 – SPR: funcionamento simplificado

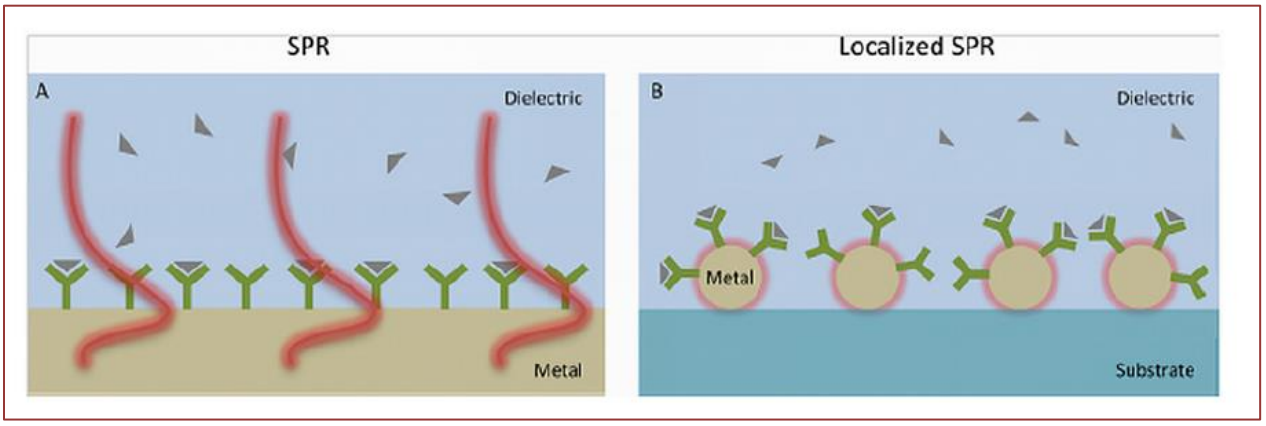


Fonte: (DAMBORSKÝ *et al.*, 2016).

Biossensores de ressonância plasmônica de superfície localizada: (sigla em inglês: LSPR: *localized surface plasmon resonance*):

A principal diferença entre em um SPR e um LSPR é o tamanho das superfícies metálicas utilizadas. Na LSPR são empregues nanoestruturas que possuam características que não são encontradas em estruturas maiores. A interação entre as nanoestruturas e a luz que incide sob a superfície cria um campo magnético de luz, que causa uma instabilidade nos elétrons e também a absorção de luz UV-VIS dentro da faixa do visível, como mostra a Figura 10, extraída de DAMBORSKÝ *et al.* (2016).

Figura 10 – Diferença de funcionamento entre SPR e LSPR: A oscilação dos plasmons no LSPR acontece junto a nanoestrutura, enquanto no SPR é ao longo de toda a superfície metálica



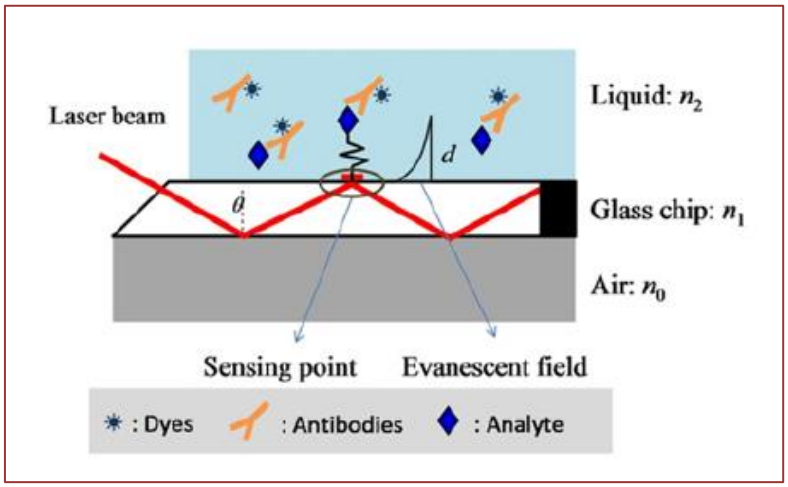
Fonte: (DAMBORSKÝ *et al*., 2016).

O LSPR possui alguns fatores de mais fácil manipulação, como material utilizado e a sua dimensão, conferindo a ele uma maior capacidade de flexibilização nas características do sensor, aumentando então sua capacidade de controlar e otimizar o processo.

Biossensores de fluorescência de onda evanescente:

Nesses biossensores a onda evanescente é responsável por permitir a ligação entre o analito e o ligante, ocasionando o reconhecimento biológico. A luz contida dentro de um guia de ondas ou de fibras gera um campo eletromagnético ao ser refletida dentro do guia de ondas ou de fibras. A qual gera uma disparidade no índice de refração do meio ao seu redor, a este campo dá se o nome de onda evanescente. Podemos ver seu funcionamento na Figura 11, extraída de DAMBORSKÝ *et al*. (2016).

Figura 11 – Funcionamento do biossensor com onda evanescente: a excitação que gera a fluorescência atua somente na superfície do sensor



Fonte: (DAMBORSKÝ *et al*. 2016).

O fato de somente moléculas localizadas na superfície serem excitadas ajuda a diminuir a presença de sinais indesejados, captando então a massa de interesse. Estes biossensores são muito importantes para a área da saúde, mostrando uma especificidade muito boa para doenças como HIV, sífilis e hepatite C. (DAMBORSKÝ *et al*., 2016).

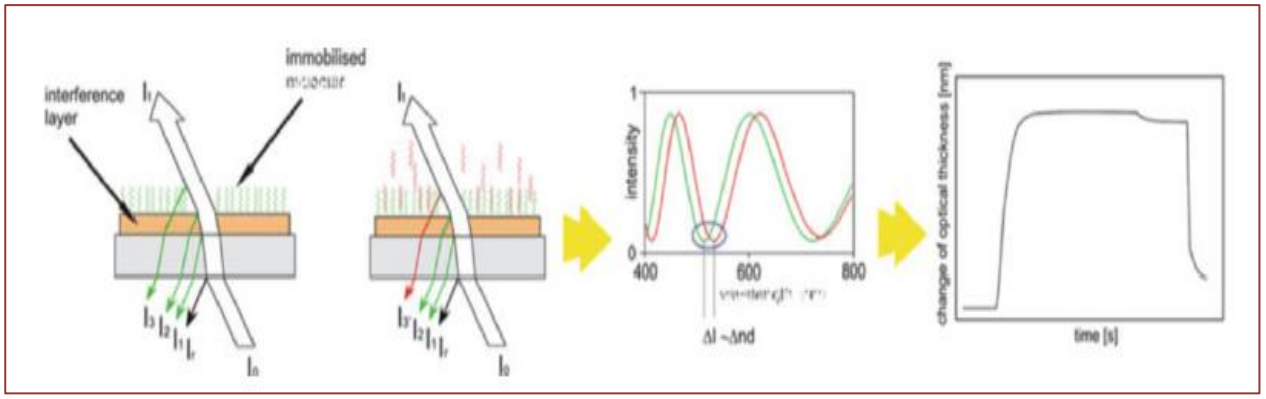
Biossensores de fibra óptica bioluminescentes:

A fibra óptica é responsável por transferir o sinal emitido do analito, sinal que por sua vez é lançado por meio de células bioluminescentes recombinantes. É possível, portanto modificar bactérias geneticamente por exemplo, para que sejam emitidos sinais luminosos na presença de compostos específicos. Ainda é viável fazer uma matriz com as bactérias modificadas para compostos diferentes, fazendo uma análise mais ampla.

Biossensores de espectroscopia de interferência reflectométrica (sigla em inglês RLFS: *reflectometric interference spectroscopy*):

A partir de alterações nas características ópticas é realizada a detecção do analito. As moléculas vão se ligando a superfície e interferindo no comprimento de onda emitido. Esta análise não utiliza rótulos e é medida em relação ao tempo, resultando então em uma curva entre as alterações no comprimento de onda e o tempo, como podemos ver na Figura 12, extraída de PROLL *et al*. (2017).

Figura 12 – Etapas da detecção por RLFS – Na parte esquerda podemos observar as alterações no comprimento de onda que provocam a detecção, e na parte direita o resultado da detecção



Fonte: (PROLL *et al*., 2017).

Comparado ao biossensor de tipo SPR, o modelo RLFS leva vantagem em relação a trocas de temperatura pois apresentam resistência a esse fator, enquanto o SPR tem facilmente seu índice de refração alterado pelas mudanças de temperatura.

5.1. APLICAÇÕES DE BIOSSENSORES ÓPTICOS

5.1.1. INDÚSTRIA FARMACÊUTICA

Dois biossensores se destacam nessa área, principalmente na obtenção de novos fármacos, o biossensor de ressonância plasmônica de superfície (SPR) e o de ressonância plasmônica de superfície localizada (LSPR). Ambos apresentam alta capacidade de medir alterações muito pequenas nos índices de refração e no equilíbrio da cinética e ligação, isso considerando suas aplicações em análises in vitro, tanto nas metodologias biológicas e bioquímicas. (OLARU *et al*., 2015).

A mensuração da cinética de ligação por SPR permite diferenciar a atuação de compostos similares, bem como ajuda a entender qual o real benefício da droga candidata e o tempo de que o composto age no organismo. É considerada uma das melhores técnicas de biossensoriamento já concretizada, se tornando padrão de utilização em todo o mundo. O LSPR dá um passo além da descoberta de novas drogas, sendo usada na triagem de drogas contra o Alzheimer por exemplo, visto que possui maior sensibilidade do que o SPR. (OLARU *et al*., 2015).

5.1.2. ANÁLISE DE ÁGUA

Os biossensores são capazes de detectar pesticidas, micro-organismos, metais pesados, toxinas e produtos farmacêuticos em águas doces e residuais. Para que isso ocorra diferentes tipos de elementos biológicos de reconhecimento são utilizados, conforme mostra a Tabela 2, extraída de DOMÍNGUEZ *et al*., (2023).

Tabela 2 – Elementos Biológicos de Reconhecimento

Elemento Biológico	Afinidade	Especificidade	Sensibilidade (Limite de detecção, ng.L-1)	Estabilidade	Versatilidade	Custo
Enzima	Alta	Média/alta	12000-1 $\cdot 10^{-4}$	Médio/baixa	Alta	Baixo
Anticorpo	Alta	Alta	250 – 0,07 $\cdot 10^{-6}$	Alta	Alta	Alto
DNA/RNA	Muito alta	Muito alta	4,14 – 4,4 $\cdot 10^{-3}$	Alta	Baixa	Baixo
Célula	Média	Média	2900 – 0,5	Alta	Média	Baixo
PIM (polímeros molecularmente impressos)	Alta	Alta	1900 – 0,08	Alta	Alta	Baixo

Fonte: DOMÍNGUEZ *et al*., (2023).

As enzimas possuem a variação entre a especificidade média e alta, pelo fato da possibilidade da mesma se conjugar com moléculas que possuem uma estrutura parecida com a de seu substrato, sendo até uma espécie de trunfo, podendo atuar na detecção de mais de um componente em um mesmo processo. Enzimas representam pouco mais de 10% no uso de biossensores para monitorar água, e são usadas para encontrar pesticidas, por exemplo. (DOMÍNGUEZ *et al*., 2023).

Os anticorpos já são mais utilizados, aproximadamente 42% utilizam desse elemento para realizar o reconhecimento biológico. Toxinas, microrganismos patogênicos e pesticidas estão dentre os poluentes monitorados. O uso de DNA/RNA é bem limitado, visto que só vão se ligar às bases nucleicas, sendo então empregados principalmente no reconhecimento de microrganismos patogênicos. (DOMÍNGUEZ *et al*., 2023).

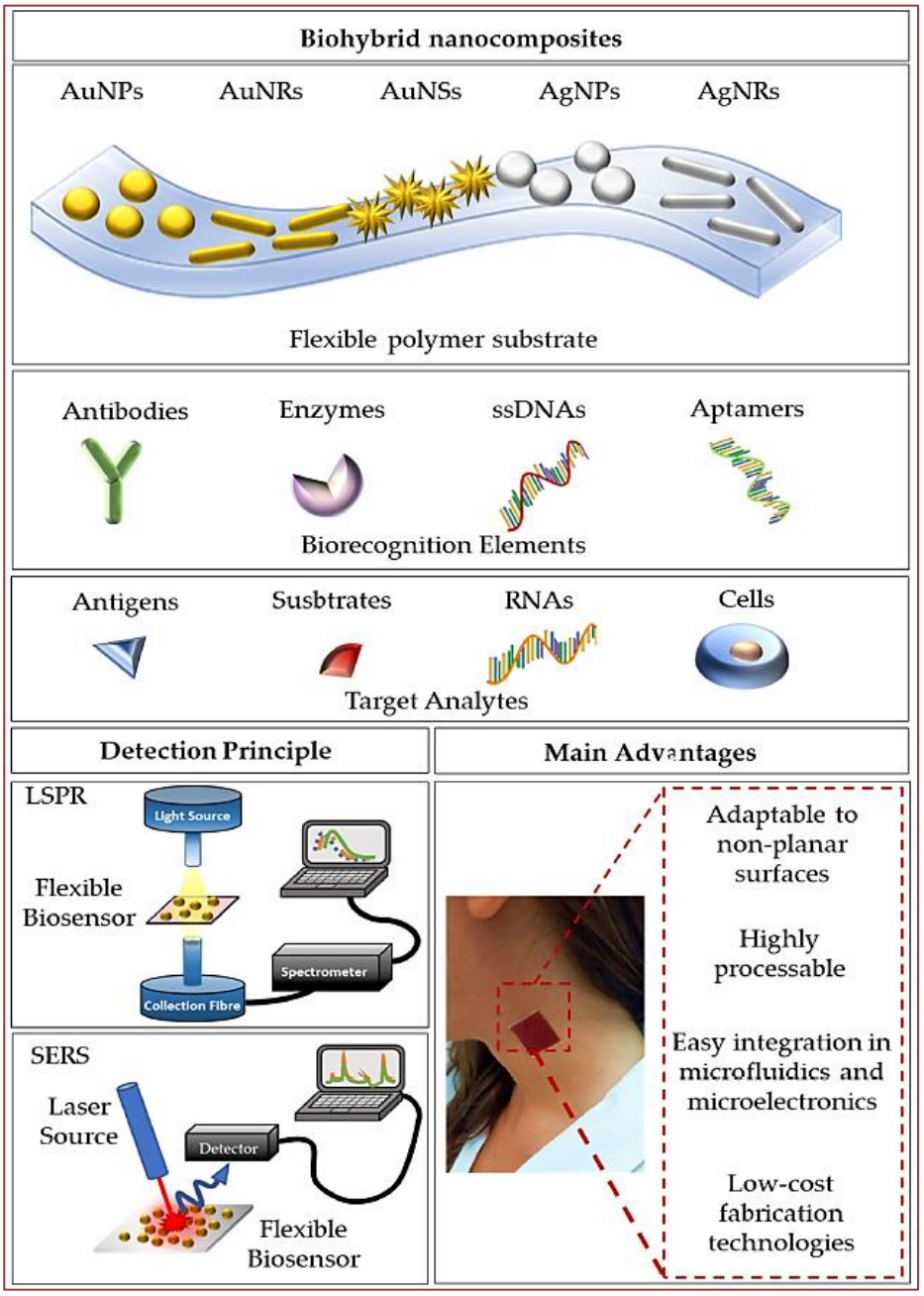
As células são os elementos com a menor especificidade nesse contexto, como ela possui uma estrutura completa, pode acabar atraindo diversos compostos, o quê por outro lado torna a mesma muito versátil, sendo utilizada na detecção de produtos farmacêuticos e metais pesados na água. Polímeros molecularmente impressos (MIP) além de compartilhar das boas capacidades dos outros elementos, consegue ser mais estável em relação aos elementos naturais, seu uso está principalmente ligado ao reconhecimento de produtos farmacêuticos.

5.2. AVANÇOS NOS BIOSSENSORES ÓPTICOS

Por conta dos avanços na fotônica e na eletrônica flexível, foi necessária a adaptação dos biossensores, modificando as plataformas ópticas para que fossem capazes de se relacionar com superfícies não planas, dando origem aos biossensores ópticos flexíveis. Algumas aplicações desses biossensores são: monitoramento de alimentos ao serem fixados nas embalagens, monitoramento de processos de cicatrização da pele ao serem dispostos sobre a pele e o controle da taxa de crescimento celular (MIRANDA *et al*., 2021).

Os substratos flexíveis conferem maior vantagem ao biossensor, sendo mais rápidos e mais baratos e permitirem o acompanhamento em tempo real do alvo. Transdutores híbridos estão por trás desta alta tecnologia, eles tanto podem ser sintéticos com nanocompósitos ou formados a partir da mistura entre polímeros naturais e nanopartículas metálicas. A utilização desses materiais permite uma assimilação fácil entre as plataformas ópticas e os dispositivos microfluídicos e microeletrônicos. (MIRANDA *et al*., 2021) Na Figura 13 podemos ver uma representação dos biossensores ópticos flexíveis, mostrando seus principais componentes e suas vantagens.

Figura 13 – Esquema simplificado da estrutura de um biossensor óptico flexível



Fonte: (extraído de MIRANDA *et al*., 2021).

Existem áreas para as quais os biossensores ópticos flexíveis ainda podem chegar a ser muito úteis, por exemplo, biossensores portáteis, que permitam que alguns diagnósticos de doenças possam ser feitos no próprio local de atendimento aos pacientes, como por exemplo os já existentes testes de gravidez, de glicose. Ainda tem o potencial de encontrar maneiras de realizar triagens rápidas dos humanos, auxiliando em situações pandêmicas, como a vivida recentemente por conta da Covid-19 (MIRANDA *et al*., 2021).

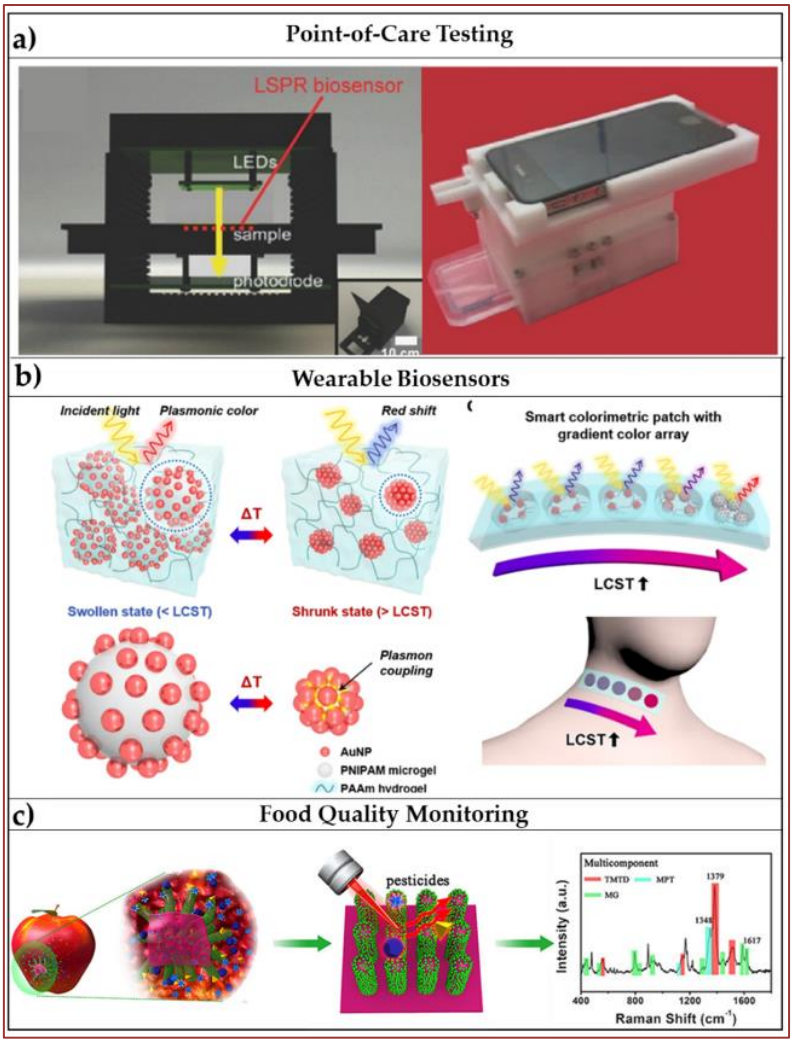
Com uma extrema necessidade de aumentar a durabilidade dos alimentos, devido ao crescente crescimento populacional e o fator desperdício, uma evolução na tecnologia de reconhecimento de patógenos e agentes tóxicos está acontecendo, sendo conhecida como

embalagem ativa inteligente. Porém, alguns problemas ainda são enfrentados, como a especificidade e a seletividade do instrumento utilizado. Existe a possibilidade da utilização de rótulos inteligentes que forneceriam uma informação a respeito da qualidade do alimento, com uma simples variação de cor (MIRANDA *et al*., 2021).

A utilização dos nanomateriais opticamente ativos demonstra muito potencial portanto na verificação alimentícia, principalmente por que essa tecnologia permite que os mecanismos de detecção atuem de forma simultânea, extraindo informações tanto da presença de agentes contaminantes no alimento, como a sua durabilidade. (MIRANDA *et al*., 2021).

Apesar dos grandes esforços para utilização dos biossensores vestíveis no diagnóstico precoce de doenças, os resultados ainda não são satisfatórios, esbarrando nas barreiras da capacidade de detecção, na falta de precisão por conta da baixa concentração dos analitos na pele, e da presença do suor que pode atrapalhar. Na Figura 14 podemos ver um esquema dos temas tratados no texto acima.

Figura 14 – Possibilidades de utilização dos biossensores flexíveis – a) Testes que apresentam resultado no próprio local. b) Biossensores vestíveis. c) Monitoramento de alimentos



Fonte: (extraído de MIRANDA *et al*., 2021).

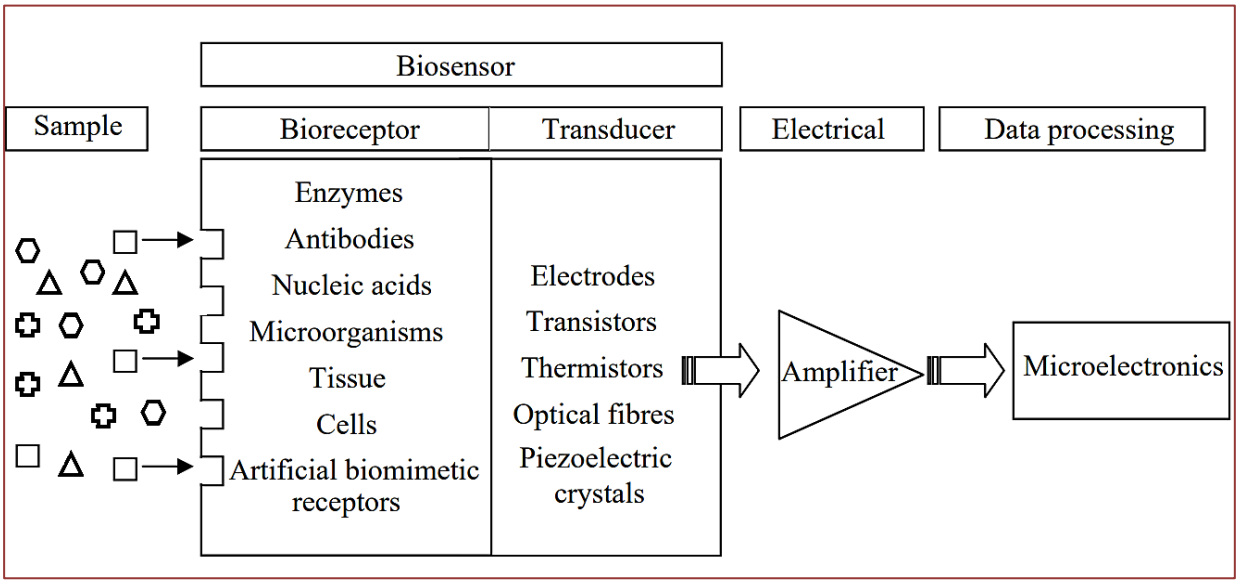
6. APLICAÇÕES EM BIOELETROQUÍMICA

Sistemas bioeletroquímicos, novas tecnologias revolucionárias de bioengenharia, integram microrganismos ou outros catalisadores de base biológica com um método eletroquímico para melhorar o metabolismo redutor ou oxidante. Geralmente, os sistemas bioeletroquímicos mostram o processo de geração de energia elétrica ou alcançam a reação de redução com um certo potencial posicionado por meio da transferência de elétrons entre o aceptor de elétrons e o doador de elétrons (MATEO C. *et al*, 2000). Embora a bioeletrônica seja um campo relativamente maduro, continua a ser uma área de pesquisa muito ativa. O reconhecimento de um evento biológico, como uma reação de ligação anticorpo-antígeno, conversão de um substrato por uma enzima ou reação de transferência de elétrons de uma proteína redox usando métodos eletroquímicos, pode levar ao desenvolvimento de novos sensores ou aprofundar nossa compreensão dos processos redox de proteínas.

Um biossensor é descrito como um dispositivo analítico compacto que incorpora elementos de detecção biológicos, fortemente acoplados ou integrados a um sistema transdutor (Figura 15). O princípio de detecção é a ligação específica da substância a elementos complementares de biorreconhecimento imobilizados em um meio de suporte adequado. A interação específica resulta em uma mudança em uma ou mais propriedades físico-químicas (mudança de pH, transferência de elétrons, mudança de massa, transferência de calor, absorção ou liberação de gases ou íons específicos) que são detectadas e podem ser medidas pelo transdutor. O objetivo usual é produzir um sinal eletrônico que seja proporcional em magnitude ou frequência à concentração de um analito específico ou grupo de analitos, ao qual o elemento biossensorial se liga (TURNER *et al*., 1986).

Até recentemente, a maioria dos biossensores era baseada em uma ou mais enzimas usadas em conjunto com um eletrodo. A reação enzimática pode ser detectada eletroquimicamente pela medição da perda ou formação de um substrato ou produto, pelo uso de uma pequena espécie de mediador que se desloca entre a enzima e o eletrodo ou, menos comumente, pela transferência direta de elétrons entre a enzima redox local e o eletrodo. A transferência direta de elétrons pode ser difícil de conseguir, uma vez que o sítio redox de uma enzima muitas vezes está oculto no interior da enzima. A aproximação próxima do local redox ao eletrodo é muitas vezes impossível sem a aplicação de um grande sobrepotencial, o que pode levar ao envenenamento do eletrodo na superfície e desnaturação da enzima. Avanços na obtenção de transferência direta de elétrons foram feitos pela modificação de uma enzima ou superfície de eletrodo com um mediador. Esses polímeros podem ser diretamente ligados à superfície do eletrodo e também pode se ligar eletrostaticamente à enzima, de modo que a enzima é considerada "conectada" e a transferência direta de elétrons entre uma enzima, como glicose oxidase (GOX) e o eletrodo torna-se possível (MURPHY, 2006).

Figura 15 – Princípio de operação de um biossensor (TURNER *et al.*, 1986). Diferentes amostras com propriedades ligantes distintas conectam-se a tipos específicos de biorreceptores (enzimas, anticorpos, ácidos nucleicos, microrganismos, tecidos, células ou receptores artificiais biomiméticos). Em seguida, um transdutor de sinal (que pode ser um eletrodo, transistor, termistor, fibra óptica ou piezelétrico) converte o sinal do biorreceptor em sinal elétrico, o qual, por meio de um amplificador, será posteriormente processado em um *software* apropriado



Assim, a enzima encontrou ampla aplicação em bioeletroquímica. Isso abrange desde eletrodos enzimáticos clássicos baseados em mediadores, sistemas com transferência direta de elétrons com eletrodos e esquemas bioeletrocatalíticos sofisticados baseados em multicamadas ou interruptores, além de células de biocombustível e unidades de detecção em ensaios de ligação. Esta revisão de literatura mostra uma visão geral sobre os diferentes campos de aplicações de biossensores bioeletroquímicos.

Existem vários biossensores disponíveis comercialmente para aplicações clínicas. E neste âmbito há também a bioeletroquímica sendo aplicada por meio de ferramentas como os biossensores. Essa tecnologia já aprimorou e desenvolveu grandes conquistas, como os sensores de glicose vestíveis para diabéticos; imunossensores para diagnóstico de doenças tropicais e viroses; biocélulas a combustível; baterias de lítio aprimoradas cientificamente que auxiliam na mobilidade e comunicação humanas, no aproveitamento da biomassa e na adição de valor a rejeitos agroindustriais.

Em particular, os sensores de glicose impressos em tela para medir os níveis de glicose em pacientes diabéticos revolucionaram o tratamento do diabetes. Estender o domínio dos biossensores para medir outros analitos, como alvos de DNA ou hormônios ou proteínas específicas, ainda não foi alcançado. Pois ainda há uma grande dificuldade de detecção da presença de ligação ao DNA ou respostas imunes. A Bioeletroquímica neste sentido é vastamente vantajosa, tendo em vista seu custo-benefício, uma vez que os sensores eletroquímicos são relativamente baratos de fabricar e usam instrumentação barata, e medições muito sensíveis são possíveis pelo uso de microelétrodos. Além disso, os eletrodos se prestam muito bem à miniaturização, de modo que podem ser incorporados a dispositivos do tipo laboratório em um chip, que requerem pequenos

volumes de reagentes e amostras. A miniaturização também tem a vantagem de encurtar os tempos de reação, pois as distâncias que os vários reagentes precisam se difundir são bastante reduzidas (MURPHY, 2006).

6.1. CONCEITOS GERAIS DE BIOSSENSORES BIOELETROQUÍMICOS

O conceito de biossensores na atualidade, se vê amplamente utilizado no meio científico e acadêmico. Os biossensores são dispositivos bioeletrônicos capazes de detectar qualitativa e rapidamente espécies químicas e/ou biológicas (analitos). Esses dispositivos são recomendados para uso em áreas como saúde, meio ambiente, alimentação e até prevenção de bioterrorismo. Os biossensores consistem basicamente de elementos biológicos, transdutores e componentes eletrônicos. Elementos biológicos ou elementos sensores têm a propriedade de reconhecer e interagir seletivamente com os analitos. Microrganismos ou materiais de organismos vivos, como anticorpos, ácidos nucléicos, células, organelas, proteínas, etc., podem ser usados na superfície do sensor. Essa interação resulta em uma mudança em uma ou mais propriedades físico-químicas (mudança de pH, transferência de elétrons, mudança de massa, transferência de calor, liberação de gás ou íon), que podem ser detectadas e medidas por sensores. O principal objetivo é produzir um sinal eletrônico proporcional em magnitude e/ou frequência à concentração de um determinado analito ou grupo de analitos que interagem com o elemento biossensível. A parte eletrônica é constituída de amplificador dos sinais elétricos e do sistema de processamento dos dados.

Diferentes transdutores podem ser utilizados em biossensores e sua escolha dependerá do biomaterial imobilizado na superfície do sensor e das propriedades de cada amostra de interesse. Quanto ao tipo de transdutor, os biossensores podem ser classificados em eletroquímicos (movimento de íons, difusão de espécies eletroativas), ópticos (mudança de temperatura), piezoelétricos (mudança de massa e/ou microviscosidade) e termométricos (absorção ou emissão de radiação eletromagnética). Dentre os vários transdutores biossensores, destacam-se os sensores eletroquímicos, alguns bastante populares, como os utilizados por diabéticos para monitorar os níveis de açúcar no sangue (FURTADO *et. al*., 2008).

Os biossensores eletroquímicos podem ser de três tipos: amperométrico, condutimétrico ou potenciométrico (THÉVENOT et al., 2001). Os biossensores amperométricos são baseados na medida de corrente elétrica, resultante de alterações de oxidação, ou redução de espécies eletroativas. Durante as análises, o potencial é mantido constante, as alterações de corrente verificadas são correlacionadas diretamente com a concentração das espécies eletroativas presentes, com a sua produção, ou com a taxa de consumo na camada biocatalítica. Os biossensores potenciométricos se baseiam na diferença de potencial entre dois eletrodos em condições de corrente elétrica constante; enquanto nos biossensores condutimétricos as mudanças são observadas nas medidas de condutância, resultante de produtos de reação catalítica. Esse tipo de sensor é utilizado, geralmente, empregando enzimas como a urease, cuja atividade origina produtos iônicos (SOTO et al., 2001).

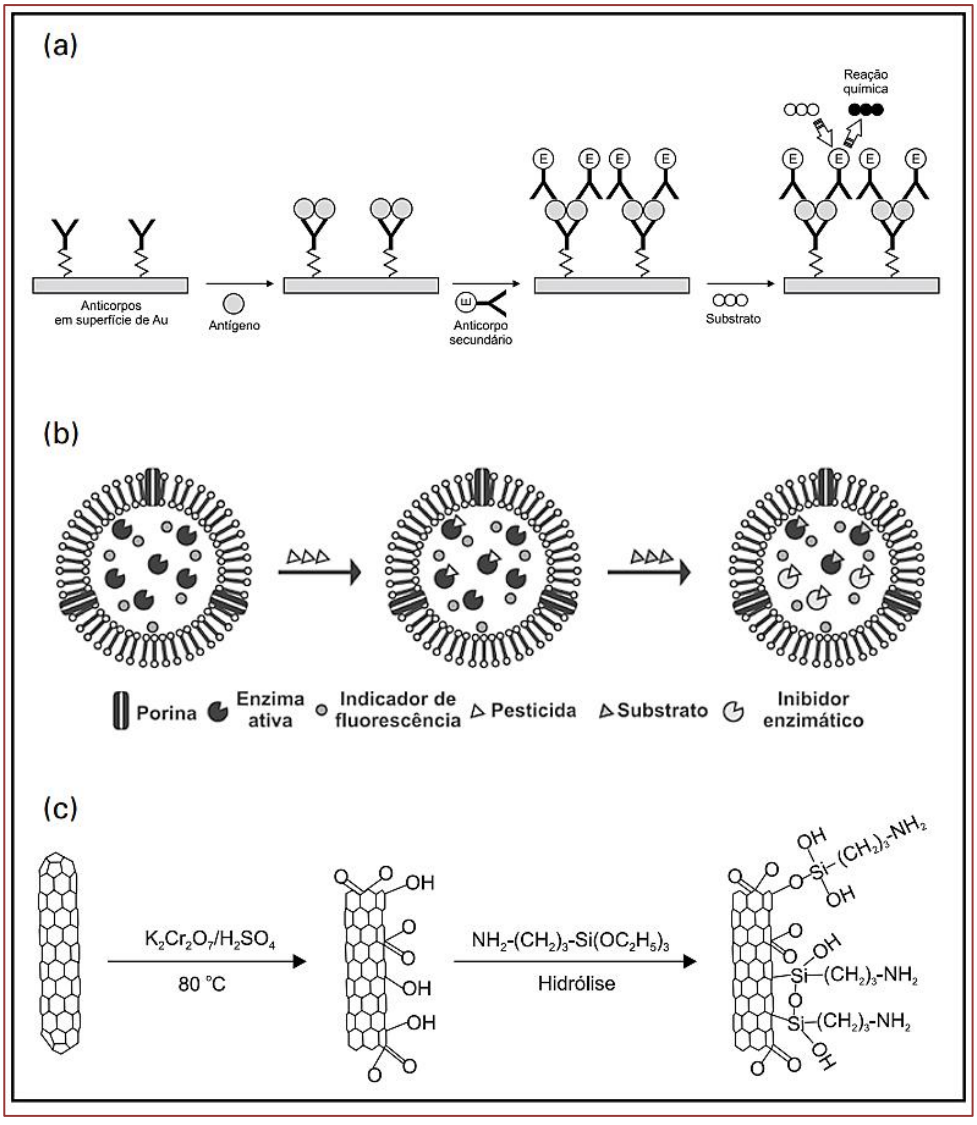
Devido à facilidade de manuseio e à correlação entre a concentração do analito e mudança na corrente, se vê uma grande utilização dos biossensores amperométricos. Em medições de corrente elétrica, quando são utilizadas enzimas como a glicose oxidase que catalisa reações de oxirredução, o material biológico não necessita de um marcador. Há necessidade de ligação enzimática catalítica (peroxidase) somente quando, no caso de anticorpos ou DNA, a interação com o analito gera poucos íons redox. A entrada de amostra pode seguir o sistema em FIA (Flow Injection Analysis) ou batelada.

A etapa de imobilização do material biológico na superfície sensorial constitui uma das fases cruciais no desenvolvimento do biossensor, pois os sítios ativos da molécula devem ser preservados, a fim de não prejudicar a reação com a amostra de interesse. Diversos métodos de imobilização do material biológico podem ser testados: oclusão (aprisionamento), microencapsulamento (confinamento em pequenas esferas), adsorção física (interações do tipo iônica, polar, ligação de hidrogênio), ligação covalente cruzada e covalente (Figura 2). Rotineiramente, têm sido usados compostos químicos como glutaraldeído (ligação covalente cruzada), cisteamina (ligação covalente), polietilenoimina (PEI), membrana de acrilamida (aprisionamento) e proteína A (presente na parede celular de cepas de *Staphylococcus aureus*), nos ensaios de imobilização de moléculas biológicas em associação ou isoladamente (FURTADO *et. al*., 2008).

Não existe um método ou suporte de imobilização único aplicável a todas as enzimas e suas várias aplicações. Isso se deve às diferentes características físico-químicas de cada enzima, às diferentes propriedades dos substratos e produtos e às diversificadas aplicações dos produtos obtidos (SOUZA, 2017). Além disso, todos os métodos apresentam vantagens e limitações. Consequentemente, as condições ótimas de imobilização para uma determinada enzima são determinadas empiricamente pelo processo de erro e acerto.

Algumas propriedades do biossensor são indispensáveis para sua comercialização, tais como, excelente estabilidade, rápido tempo de resposta, boa seletividade, baixo limite de detecção e exatidão (FURTADO *et. al*., 2008). Nesse sentido, após o biossensor ser desenvolvido parâmetros como, influência do pH, temperatura e presença de substâncias interferentes, precisam ser estudados para a caracterização e validação deles. A estabilidade do biossensor está relacionada com o tipo de imobilização e o material biológico imobilizado, assim como o tipo de amostra a ser utilizada.

Figura 16 – Métodos de imobilização de material biológico: Na seção a) é descrito o método de ligação covalente a qual consiste na ligação da enzima ao suporte por ligações covalentes. Inicia-se com a modificação da superfície do suporte por meio de reações de ativação, na qual os grupos funcionais do suporte são modificados para produzir intermediários reativos; b) o microencapsulamento envolve a polimerização in situ da matriz porosa em torno dos biocatalisadores a serem imobilizados. A enzima é incorporada como parte da mistura reativa a ser polimerizada. À medida que a polimerização prossegue, a matriz polimérica se forma em torno da enzima, confinando-a em sua estrutura; c) Na adsorção física as enzimas são imobilizadas no suporte por meio de ligações como interações hidrofóbicas, forças de Van der Waals, ligações de hidrogênio e ligações iônicas.



Fonte: (FURTADO *et. al.*, 2008).

A utilização dos biossensores possui muitas vantagens, deste modo são amplamente e correntemente usados em várias áreas científicas. As vantagens dos biossensores em relação às técnicas convencionais não se limitam à sensibilidade e seletividade, mas ao fato de, geralmente, dispensarem um elaborado pré-tratamento da amostra (praticidade),

rapidez nas análises e gastos mínimos de reagentes, proporcionando assim, agilidade na obtenção dos resultados, e redução no custo financeiro (TELES, 2006). Aplicações dos biossensores podem ser encontradas em diferentes áreas do conhecimento nomeadamente Bioquímica, Bioeletroquímica, Microeletrônica, Engenharia de Superfícies e de Polímero, Robótica e Automação, entre outras áreas.

6.2. BIOELETROQUÍMICA

A Eletroquímica é uma área da físico-química que estuda as reações que envolvem transferência de elétrons e seus fenômenos associados por meio de um dispositivo chamado célula eletroquímica pelo qual ocorrem reações de oxirredução para produzir interconversão de energia química em elétrica. É uma ferramenta poderosa para desenvolvimento de métodos de diagnóstico mais acurados (BERETTA e GRANDIN, 2004).

Processos eletródicos envolvem reações químicas com transferência de cargas, por uma interface condutora, uma fase contínua e uma fase adjacente. Esse sistema eletroquímico é basicamente formado por um solvente, um eletrólito de suporte, uma substância eletroativa e eletrodos. A combinação dos vários componentes influi no desenvolvimento da reação eletroquímica (PAULA, 2006).

Com a possibilidade de imobilizar as enzimas vieram vários estudos relacionados com a cinética enzimática e desenvolvimento de biossensores, por exemplo, o sensor de penicilina, desenvolvido e estudado no grupo Nanobionics, o qual resultou no trabalho Penicilinase-based amperometric biosensor for penicillin, de GONÇALVES *et al*. (2014), fornecendo sinais analíticos referentes à abertura do anel β-lactâmico da penicilina pela metaloenzima, sendo esta responsável pela alta sensibilidade e seletividade do sensor, o que trouxe novos questionamentos relacionados ao mecanismo enzimático envolvido na reação (GONÇALVES *et al*., 2014).

Em experimentos, foi estabelecido que informações importantes sobre as propriedades redox de uma proteína podem ser obtidas a partir de experimentos nos quais a troca direta de elétrons ocorreu entre o eletrodo e o sítio ativo. Desde então, muitos desenvolvimentos importantes ocorreram no projeto e caracterização estrutural de superfícies de eletrodos que são ativas com proteínas. O dogma enganoso de que a adsorção de proteínas sempre apresenta um problema indesejável deu lugar a ideias mais construtivas nas quais o estado adsorvido realmente fornece a chave para estudar e compreender esses sistemas complexos, muitos dos quais estão intimamente associados a interfaces (por exemplo, membranas) em seu estado natural. (ARMSTRONG e WILSON, 2000).

Os biossensores eletroquímicos são dispositivos capazes de fornecer sinais analíticos do meio operacional através do uso de componentes biológicos como parte do sensor. O biocomponente é responsável pela alta seletividade molecular e pela formação de produtos detectáveis, se o analito em si não for eletroativo. A detecção eletroquímica pode ser amperométrica (medindo-se uma diferença de cargas), potenciométrica (medindo-se uma diferença de potencial), condutométrica (medindo-se mudanças na condutância entre eletrodos), impedanciométrica (medindo-se mudanças de impedância no eletrodo).No entanto, os biossensores amperométricos são os mais pesquisados, em função de seu relativo baixo custo de construção, potencial para miniaturização, facilidade de automação e construção de equipamentos simples e portáteis (SANTOS, 2008).

Consequentemente, esforços têm sido feitos para alcançar forte adsorção de proteínas em eletrodos modificados de forma a preservar as propriedades nativas ou fornecer um ambiente bem definido no qual a transferência de elétrons ou espectroscopia características podem ser sondadas.

6.3. APLICAÇÕES DOS BIOSSENSORES ELETROQUÍMICOS

As vantagens dos biossensores em relação às técnicas convencionais não se limitam à sensibilidade e seletividade, mas também ao fato de, geralmente, dispensarem um elaborado pré-tratamento da amostra (praticidade), rapidez nas análises e gastos mínimos de reagentes, proporcionando assim, agilidade na obtenção dos resultados e redução no custo financeiro.

Aplicações na área da saúde: Na área da saúde, o mais conhecido é o biossensor eletroquímico usado para acompanhamento do nível de glicose no sangue, principalmente por diabéticos. O aparelho pode ser adquirido facilmente em farmácias com a opção de diferentes marcas. Biossensores comerciais para o monitoramento de lactose, ureia, creatinina e colesterol encontram-se em fase de desenvolvimento. Os sensores desenvolvidos para a detecção do glutamato são geralmente baseados na imobilização das enzimas glutamato desidrogenase (CHAKRABORTY e RAJ, 2007), glutamato oxidase (TIAN *et al*., 2009) e a co-imobilização das duas (BASU *et al.*, 2006), com diversa estratégias de imobilização. Baseado também na utilização de enzimas como elemento de reconhecimento molecular, existe disponível comercialmente um biossensor que é capaz de fornecer em tempo real alterações na concentração de glutamato no cérebro de roedores (Pinnacle Technology, Inc.).

Aplicações na indústria de alimentos: Para garantir a qualidade dos produtos e o controle das etapas de produção, as indústrias de bebidas e de alimentos necessitam de métodos analíticos para detecção de contaminantes e de patógenos que sejam rápidos e precisos. Os biossensores podem ser utilizados para avaliar os componentes químicos presentes na composição dos alimentos, como os seus componentes naturais, aditivos alimentares e pesticidas, bem como a identificação e quantificação de diversos componentes naturais nos alimentos. A análise desses componentes poderia contribuir de forma significativa no campo de controle de qualidade (OLIVEIRA e PEREIRA, 2016).

A concentração de glicose é um indicador importante na indústria de alimentos para controle de qualidade. A grande maioria dos biossensores é baseada em enzimas que consomem oxigênio e produzem peróxido de hidrogênio durante uma reação catalítica, conhecidas como enzimas oxidases. Mattos e Areias (2023) desenvolveram em 2005 um biossensor baseado em um filme fino de azul da Prússia depositado em um eletrodo de carbono vítreo imobilizado com glicose oxidase empregando Nafion® (polímero) para análise de café solúvel. O sistema conseguiu analisar 60 amostras por hora e mostrou grande estabilidade e aplicabilidade para indústria.

Embora existam técnicas analíticas tradicionais que atendem a estes requisitos, estas requerem elevado investimento financeiro e geralmente um longo tempo para preparo das amostras. Os biossensores tem se mostrado como uma alternativa promissora neste campo, graças à seletividade, à rapidez e ao baixo custo deste tipo de tecnologia. Embora, nos últimos anos, tenha sido publicado um grande número de trabalhos sobre o uso de biossensores para análise de alimentos, poucos desses sistemas estão disponíveis comercialmente, uma das razões para este fato é a curta vida útil do componente biológico

(MAGALHÃES, 2010).

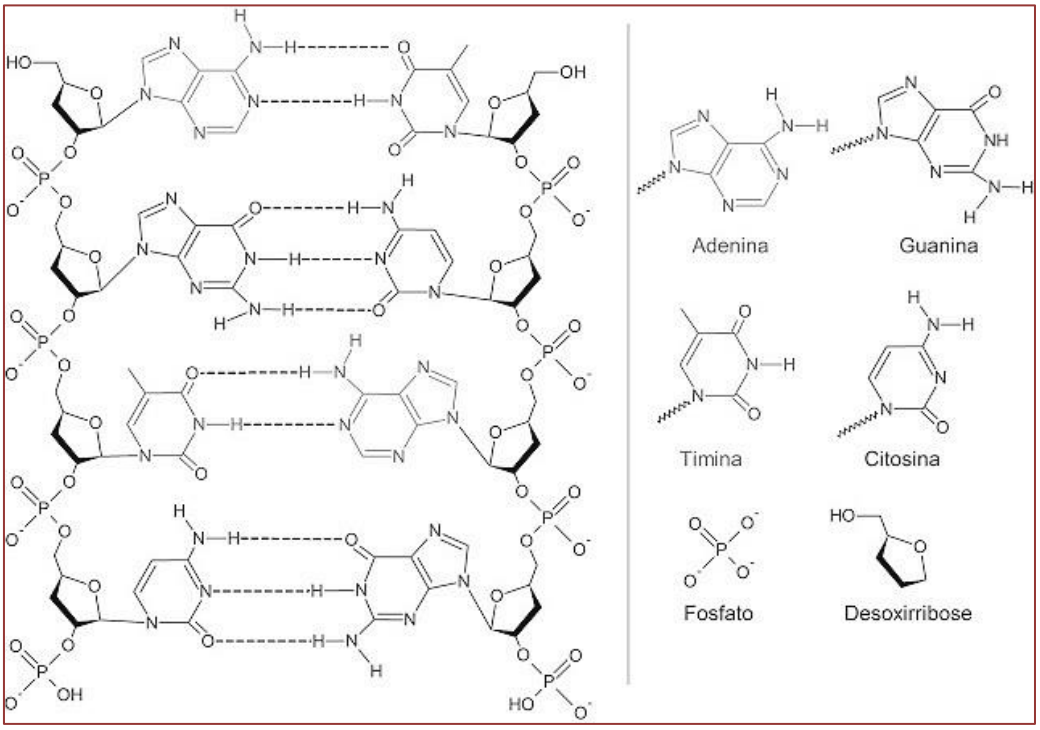
Aplicações na agricultura e pecuária: A detecção de vírus e protozoários por biossensores eletroquímicos tem crescido nos últimos anos, mas patógenos bacterianos ainda são os mais comumente detectados. Eletrodos planares de ouro são os mais frequentemente empregados e os nanoestruturados são crescentemente investigados. Biossensores de baixo custo, reutilizáveis, vestíveis e sem fio estão entre os novos desafios investigados. Os biossensores eletroquímicos permitem a detecção rápida, sem preparo de amostras em variadas matrizes ou em superfícies, alta sensibilidade, com plataformas de baixo custo. Esses aspectos são desafios para técnicas bioanalíticas tradicionais e muito importantes para mitigar a pandemia de COVID-19 (CESEWSKI e JOHNSON, 2020).

Na agricultura, biossensores podem detectar e quantificar patógenos de plantas no campo, podendo orientar o produtor a realizar aplicações de pesticidas pontuais, reduzindo e otimizando o uso de agroquímicos. Também podem ser utilizados no monitoramento de pesticidas no meio ambiente e em diversos alimentos. Na pecuária, os biossensores têm sido recomendados para detecção de drogas veterinárias residuais, já que o uso de hormônios esteroides em animais destinados ao abate é proibido. Imunoensaios e biossensores têm sido desenvolvidos para analisar a presença de hormônios e antibióticos através de secreções e urina de animais com resultados bastante satisfatórios (FURTADO, *et al*., 2008).

Biossensor de DNA: Como já descrito biossensores são definidos como dispositivos analíticos incorporados a um material biológico, a um material derivado biologicamente ou integrado com um transdutor, que pode ser óptico, eletroquímico, termométrico, piezelétrico ou magnético. Eles vêm sendo aplicados a uma grande variedade de problema analítico tanto na medicina, quanto no meio ambiente e na alimentação. Há uma vasta gama de matérias que podem ser incorporados aos sensores. Os biossensores de DNA em questão, são utilizados nos estudos de interações cinéticas entre compostos biologicamente ativos e DNA, através de técnicas eletroquímica (voltametria cíclica, técnica de pulso diferencial, voltametria de onda quadrada, entre outras) (GUTIERREZ, 2023 e NGUYEN, 1988).

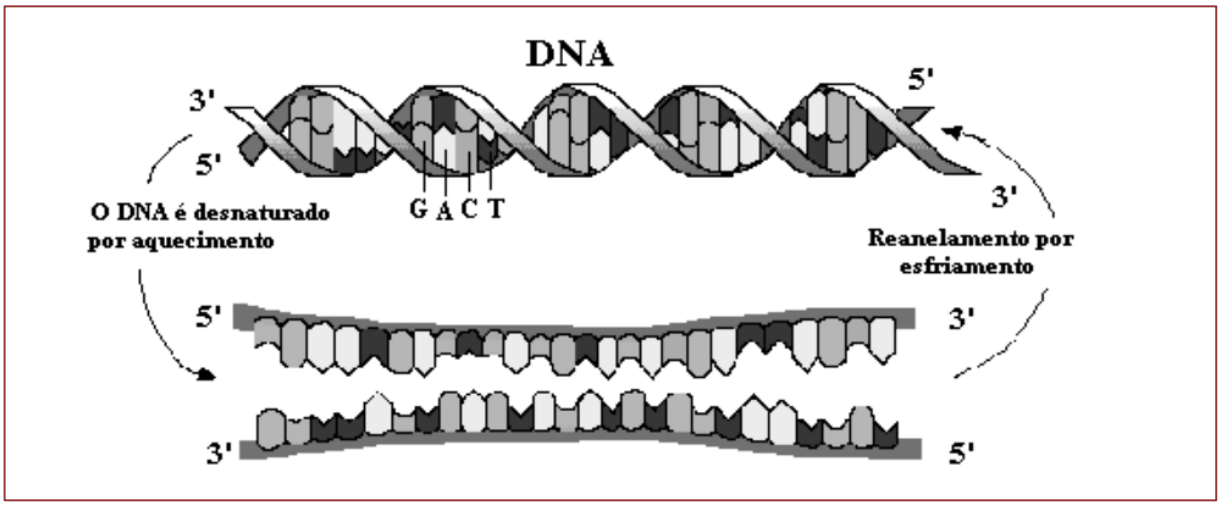
Biomacromoléculas têm papel importante nos processos básicos da vida. Dentre elas estão os ácidos nucléicos, as proteínas e os polissacarídeos. Estudos relacionados à determinação de suas estruturas, propriedades e interações com outras substâncias, tornou-se essencial para a compreensão de vários processos biológicos. No caso do DNA, a estrutura tridimensional de sua dupla hélice, consistindo de duas fitas, cada uma delas formadas por grupos fosfatos, pentoses e bases púricas e pirimídicas ligadas através de ligações de hidrogênio é de fundamental importância (figura 17).

Figura 17 – Ligações de hidrogênio entre as nucleobases do DNA em fita dupla (MAXIMIANO V. R., 2017). Ilustração dos tipos de ligação em uma hélice dupla e do direcionamento 50-30. Onde há ligações covalentes (linhas contínuas) e ligações de hidrogênio (linhas pontilhadas)



O DNA é um dos alvos biológicos de maior relevância para a ação de fármacos. A figura 18 mostra a desnaturação de uma molécula de DNA por aquecimento. A interação de fármacos com o DNA é considerada um dos mais importantes aspectos em descoberta de fármacos e em processos de desenvolvimento farmacêutico. São três as possibilidades de interação. A primeira delas ocorre pelo controle dos fatores de transcrição e de polimerases, nos quais os fármacos interagem com proteínas que se ligam ao DNA. O segundo faz-se através da ligação com RNA tanto com a dupla hélice do DNA, formando tripla hélice, ou com a fita simples, com a formação de híbridos, que podem interferir com a atividade de transcrição. No último caso, há interação de pequenas moléculas diretamente na estrutura do DNA. Essa modificação covalente do DNA por agentes citotóxicos representa uma lesão bioquímica grave. Nesse caso, as interações podem ser eletrostáticas, geralmente inespecíficas, com o envolvimento do arcabouço negativo (açúcar-fosfato), via intercalação entre os pares de bases ou interação covalente.

Figura 18 – A figura ilustra a desnaturação de uma molécula de DNA por aquecimento com a representação do DNA, em fita dupla e em fita simples, evidenciando suas bases constituintes, guanina (G), adenina (A), citosina (C) e timina (T)



Fonte: (MAXIMIANO, 2017).

Estudos em biossensores de DNA, tornam-se úteis para auxiliar a esclarecer o mecanismo biológico de ação. Há uma possível interação de um analito com DNA, onde o analito entra entre as fitas do DNA, modifica sua conformação, o que leva à exposição de suas bases, passíveis de oxidação anódica (PAULA, *et al*, 2008).

Nos últimos anos, os eletrodos modificados com DNA foram aplicados com sucesso tanto como superfícies modificadas para determinação eletroanalítica de fármacos, quanto para o estudo da interação dos mesmos com o ácido desoxirribonucleico. Eles permitem avaliar e predizer interações com prejuízos celulares, através de experimentos eletroquímicos (voltametria de pulso diferencial e de onda quadrada, em eletrodos de carbono vítreo modificados com DNA em fita dupla e simples) baseados na observação da ligação das moléculas-teste com ácidos nucléicos (PAULA, *et al*, 2008).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

São inúmeros estudos que comprovam eficácia e aprimoramento das técnicas já empregadas com uso de biossensores, imunossensores e Genossensores. São relevantes as atualizações dos estudos de desenvolvimento biotecnológico a cerca do assunto, pois abrange diversas áreas da saúde e consequentemente impacta na condição de vida de inúmeros de pacientes por todo o mundo. Uma única evolução nunca vem sozinha, devemos caminhar lado a lado da ciência e sermos criativos quanto à elaboração de novas ferramentas em prol da nossa própria saúde. Diversas doenças são diagnosticadas quando o indivíduo já sofre sequelas da mesma, não se tem um pré-diagnóstico clínico que estabelece a detecção, afim de buscar um tratamento ou até mesmo uma prevenção. Para isso a adaptação, os estudos e desenvolvimento de biossensores, genossensores e imunosssensores são fundamentais na atualidade no combate ao câncer por exemplo, onde podemos ter uma detecção antes mesmo de se formar e causar danos severos a saúde.

Aponta-se diversas demandas no desenvolvimento de testes rápidos para um breve diagnóstico, antes mesmo que uma doença possa desencadear ao paciente em um grau mais elevado, submetendo o indivíduo a um tratamento adequado e certeiro. Salienta-se que a presente revisão bibliográfica descreve apenas três tipos de doenças que acometem em indivíduos aleatórios, seja adultos, adolescentes ou crianças, onde muitos outros casos de muitas outras doenças permanecem com pouco estudo, sendo imprevisível como que estes testes se portariam em amostras reais e não somente em fase de laboratório. Portanto, faz-se necessário aplicações das técnicas aqui descritos, sendo que muito delas são passíveis de imediata aplicação e estudos constantes de aprimoramento das técnicas já existentes e novos avanços científicos.

O uso dos biossensores, que são dispositivos integrados, autossuficientes, que fornecem dados analíticos qualitativos e semiquantitativos por meio do uso de um elemento de reconhecimento biológico acoplado a um elemento de transdução, representam um método rápido, de baixo custo e fácil de operar, para análise destes compostos. A crescente preocupação da humanidade com a qualidade de alimentos e com o meio ambiente induz à busca por sistemas analíticos que propiciem condições de monitoramento principalmente em locais com baixos recursos.

Os biossensores possuem a capacidade de produzirem respostas rápidas, confiáveis e atendem a necessidade na detecção de poluentes ambientais. Porem deve-se destacar a exigência quanto as necessidades de sensibilidade e seletividade se empregados em sistemas complexos com composição diversificada. No tratamento ambiental é importante levar e conta o desenvolvimento de biossensores de uso contínuo. No entanto isso exige que a renovação da atividade biológica seja rápida durante os ciclos de análise. Outros fatores são quanto a portabilidade do equipamento, custo e também a possibilidade de automatizar e fazer a integração com dispositivos profissionais, diferente do que se aplica nos sistemas atuais onde o desempenho é avaliado com base em amostras laboratoriais padrão.

No que diz respeito ao diagnóstico de câncer o uso de biossensores consiste em um método rápido, de baixo custo e de amplo acesso para a população. Um outro ponto positivo, principalmente para o diagnóstico precoce do câncer de próstata, seria a substituição do exame de toque retal, que mesmo hoje em dia ainda é visto como preconceito pela sociedade. Na detecção do PSA, os testes realizados apresentaram uma tecnologia passível de ser usada nas análises clínicas de forma segura, rápida, de baixo custo e independente da técnica escolhida. Mesmo que ainda estão sendo aperfeiçoadas, seja na técnica, no material, melhora da captação do sinal, é uma tecnologia promissora e de suma importância no diagnóstico precoce do câncer. O estudo, aprimoração e utilização de biossensores na área de câncer tem feitos mais do que visíveis. Os biomarcadores de câncer são indicadores importantes do crescimento tumoral, eles não são usados somente para diagnosticar e monitorar doenças, mas também para fornecer uma abordagem prognóstica ao tratamento. Esse campo emergente tem papel crítico na construção de técnicas altamente sensíveis, rápidas, de fácil utilização e confiança na detecção precisa do câncer. Na qual é de vital importância, pois quanto mais rápido o diagnóstico do câncer maior será a taxa de sucesso do tratamento e recuperação dos pacientes.

Isso também vale para o desenvolvimento de opções de biossensores para câncer mais baratos no mercado, pois sabemos da complexidade e diversidades de câncer existentes e dos muitos desafios enfrentados na área médica, porém a tecnologia de biossensores tem o potencial de fornecer resultados rápidos e precisos, mantendo a relação custo-benefício. Já os biossensores ópticos podem desempenhar importantes funções no dia a dia da

humanidade, principalmente na área alimentícia e de saúde. Nesta revisão foram abordados alguns aspectos de diferentes tipos de biossensores, demonstrando as principais atividades a que cada um é ligado. Sendo uma tecnologia muito útil, a mesma vem encontrando aumento na busca por melhorias que venham a facilitar seu emprego e reduzir as potenciais complicações que impedem o seu uso. Com avanço suficiente, poderemos ter até uma comercialização mais simples e barata, conferindo maior disponibilidade do produto e qualidade dos serviços oferecidos. O desenvolvimento de biossensores pode contribuir com grandes avanços no controle de qualidade dos alimentos, contribuir para avanços científicos para controle de doenças na medicina, identificação de patógenos do solo na área agroindustrial e na área biológica nos estudos do mecanismo biológico de ação do DNA.

Em termos gerais, os biossensores são dispositivos que combinam de forma eficaz a seletividade e especificidade que as reações biológicas oferecem. Eles apresentam uma série de características vantajosas em relação às técnicas de análise convencionais. Entre elas destacam-se: alta seletividade e sensibilidade, baixo custo, manejo sem técnicos especializados, portabilidade, análise em tempo real, resposta rápida e sem necessitar do pré-tratamento da amostra.

Recentemente, houveram muitos avanços interessantes neste campo em particular, grandes melhorias na sensibilidade da resposta foram feitas. Embora dispositivos comerciais para detecção eletroquímica de DNA ou imunodetecção de uma etapa ainda não foram realizados, as aplicações potenciais e vantagens da eletroquímica DNA e imunossensibilidade são tão bons que continua a ser uma área de pesquisa muito ativa. Assim, pode-se concluir que os biossensores representam uma alternativa viável que abrange muitas áreas científicas.

REFERÊNCIAS

[1] ABC do câncer: Abordagens Básicas para o Controle do Câncer. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Câncer (INCA), 2011. 128 p. ISBN 978-85-7318-188-3.

[2] ALFAYA, A. A. S.; KUBOTA, L. T. The use of materials obtained by the Sol-Gel process in the construction of biosensors. New Chemistry, v. 25, n. 5, p. 835 - 841, 2002.

[3] ALFAYA, A. A.S; KUBOTA, L. T. A utilização de materiais obtidos pelo processo de sol-gel na construção de biossensores. 2001. Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, SP. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/mTPYTRX8MLcq97hCM3cBZJz/?lang=pt>. Acesso em: 20 jan 2022.

[4] ALTINTAS Z, TOTHILL IE. Molecular biosensors: promising new tools for early detection of cancer. Nanobiosensors in Disease Diagnosis. 2015; 4:1–10.

[5] ALVES, L. M. Desenvolvimento de biossensor eletroquímico para detecção de glutamato. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Genética e Bioquimica. 2014.

[6] ALZHEIMER'S SOCIETY. Whats is Alzheimer's disease. 2018. Disponível em:<http://www.alzheimers.org.uk/site/scripts/documents_info.php?documentID=100>. Acesso em: 11 ago 2022.

[7] ANDRADE, Rodrigo de Oliveira. Biossensores na medicina. [S. l.]: Pesquisa FAPESP, ago 2017. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/biossensores-na-medicina/. Acesso em: 18 ago. 2022.

[8] ARMSTRONG, F. A., WILSON G. S., Recent developments in faradaic bioelectrochemistry, Electrochimica Acta, Volume 45, Issues 15–16, 2000, Pages 2623-2645. Acesso em 18 de março. 2023.

[9] ARRIAZA-ECHANES, C.; CAMPO-GIRALDO, J.L.; QUEZADA, C.P.; ESPINOZA-GONZÁLEZ, R.; RIVAS-ÁLVAREZ, P.; PACHECO, M.; BRAVO, D.; PÉREZ-DONOSO, J.M. Biomimetic synthesis of CuInS2 nanoparticles: Characterization, cytotoxicity, and application in quantum dots sensitized solar cells. Arab.

J. Chem. 2021

[10] ASAL, M.; OZEN, O.; SAHINLER, M.; POLATOGLU. I. Recent Developments in Enzyme, DNA and Immuno-Based Biosensors. Sensors, v. 18 p.1924, 2018.

[11] BACCHU, M.S.; ALI, M.R.; DAS, S.; AKTER, S.; SAKAMOTO, H.; SUYE, S.I.; RAHMAN, M.M.; CAMPBELL, K.; KHAN, M.Z.H. A DNA functionalized advanced electrochemical biosensor for identification of the foodborne pathogen Salmonella enterica serovar Typhi in real samples. Anal. Chim. Acta. 2021.

[12] BANULS, M.; PUCHADES, R.; MAQUIEIRA, A. Chemical surface modifications for the development of silicon-based label-free integrated optical (IO) biosensors: A review. Analytica Chimica Acta, v. 777, p. 1-16, 13 mar. 2013.

[13] BASIL, C. F., ZHAO, Y., ZAVAGLIA, K., JIN, P., PANELLI, M. C., VOICULESCU, S., … WANG, E. (2006). Common Cancer Biomarkers. Cancer Research, 66(6), 2953–2961. doi: 10.1158/0008-5472.can-05-3433

[14] BASU, A.K.; CHATTOPADHYAY, P.; ROYCHUDHURI, U.; CHAKRABORTY, R. Abiosensor based on co-immobilized L-glutamate oxidase and L-glutamatedehydrogenase for analysis of monosodium glutamate in food. Biosensors &Bioelectronics, v. 21, n. 10, p. 1968–1972, 2006. Acesso em 31 de março. 2023.

[15] BATZIAS, F.; SIONTOROU, C. G. A novel system for environmental monitoring through a cooperative/synergistic scheme between biondicators and biosensors. Journal of Environmental Management. v. 82, n. 2, p. 221 - 239, 2007.

[16] BERETTA, M.; GRANDIN, K. A galvanized network: Italian-Swedish scientific relations from Galvani to Nobel. Stockholm: Royal Swedish Academy of Sciences, 2001. 221 p. Acesso em 18 de março. 2023.

[17] BILAL, M.; HAFIZ, M.N. Iqbal, Microbial-derived biosensors for monitoring environmental contaminants: Recent advances and future outlook, Process Safety and Environmental Protection, v. 124, p. 8-17, 2019 https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.032.

[18] BOHUNICKY B, MOUSA S.A. Biosensors: the new wave in cancer diagnosis. Nanotechnology, science and applications. 2011; 4:1.

[19] BRAZACA, L.C. Desenvolvimento de biossensores para auxilio do diagnóstico do mal de Alzheimer para quantificação rápida de melatonina e para determinação simples do traço genético de anemia falciforme. 2019. 185p. Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

[20] BUTTERWORTH, F.M.; CORKUM, L.D.; GUZMÁN-RINCÓN, J. Biomonitors and biomarkers as indicators of environmental change, Environmental Science Research, Plenum Press, London, Vol. 50 (1995).

[21] CAMMANN, K. Bio-sensors Based on Íon-selective Electrodes. Fresenius' Zeitschrift feur Analytische Chemie , v. 287, p. 1-9, 1977.

[22] CAO, W.; JU, P.; WANG, Z.; ZHANG, Y.; ZHAI, X.; JIANG, F.; SUN, C. Colorimetric detection of H2O2 based on the enhanced peroxidase mimetic activity of nanoparticles decorated Ce2(WO4)3 nanosheets. Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc. 2020

[23] CASTELLANO L.R., CORREIA-FILHO D., AGIRO L., DESSEIN H., PRATA A., DESSEIN A., RODRIGUES V. Th1/Th2 immune responses are associated with active cutaneous leishmaniasis and clinical cure is associated with strong interferon-γ production. Hum. Immonol. 2009.

[24] CASTILLO, J.; GASPAR, S.; LET, S.; NICULESCU, M.; MORTARI, A.; BONTIDEAN, I.; SOUKHAREV, V.; DORNEANU, S. A.; RYABOV, A. D.; CSÖREGI, G. Biosensors for life quality – Design, development and applications. Sensors and Actuators B: Chemical. v. 102, n. 2, p. 179 - 184, 2004.

[25] CESEWSKI, E.; JOHNSON, B. N. Electrochemical biosensors for pathogen detection. Biosens Bioelectron. V. 159, p. 112214, jul. 2020. DOI: 10.1016/j.bios.2020.112214. Acesso em 31 de março. 2023.

[26] CHAKRABORTY, S.; RAJ, C.R. Amperometric biosensing of glutamate usingcarbon nanotube-based electrode. Electrochemistry Communications, v. 9, n.6, p. 1323–1330, 2007. Acesso em 31 de março. 2023.

[27] CHANG, H.J.; VOYVODIC, P.L.; ZUNIGA, A.; BONNET, J. Biossensores derivados de micróbios para diagnóstico, monitoramento e epidemiologia. Microb. Biotecnologia.v.10, p. 1031–1035, 2017.

[28] Chen, C.; Junsheng W. Optical Biosensors: an exhaustive and comprehensive review. Analyst. 2020.

[29] CHEN, Y.; LIU, J.; YANG, Z.; WILKINSON, J.S.; ZHOU, X. Optical biosensors based on refractometric sensing schemes: A review. Biosens Bioelectron, 2019. Disponível em: < https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8879434/#B26-sensors-22-01513 >. Acesso em: 25/03/ 2023.

[30] CLARK, L.; LYONS, C. Electrode Systems for Continuous Monitoring in Cardiovascular Sugery. Annals of the New York Academy of Sciences, v. 102, p. 29-45, 1992.

[31] CLARK, L.C. Biosensors & Bioelectronics. Guest Editorial. 8 (1): iii-vii, 1993.

[32] COLE, R.H., TANG, S.-Y., SILTANEN, C.A., SHAHI, P., ZHANG, J.Q., POUST, S., GARTNER, Z.J., ABATE, A.R. Printed droplet microfluidics for on demand dispensing of picoliter droplets and cells. Proc. Natl. Acad. Sci. 114, 8728–8733. 2017. Disponível em: >https://doi.org/ 10.1073/pnas.1704020114<

[33] CUZICK, J.; MAYRAND, M. H.; RONCO, G.; SNIJDERS, P.; WARDLE, J. Chapter 10: New dimensions in cervical cancer screening. Vaccine. 2006.

[34] DAMBORSKÝ, P.; SVITEL, J.; KATRLÍK J. Optical Biosensors. Port. P., v.60, p. 91-100, 2016.

[35] DANIELSSON, B.; XIE, B.; RAMANATHAN, K. Mini/micro thermal biosensors and other related devices for biochemical/clinical analysis and monitoring. Trac-Trends in Analytical Chemistry, v. 19, n. 5, p. 340-349, may. 2000.

[36] DELL'ATTI D, TOMBELLI S, MINUNNI M, MASCINI M. Detection of clinically relevant point mutations by a novel piezoelectric biosensor. Biosens Bioelectron. 2006;21(10):1876–1879.

[37] DOMÍNGUEZ, H. M.; LUNA, M. G.; MAHLKNECHT, J.; CHENG, Q.; HERNÁNDEZ, A. I.; SOTO, O. N. Optical Biosensors and Their Aplications for the Detection of Water Pollutants. Biosensors. 2023

[38] DUFFY, G et al. 2017. PhosphaSense: Um dispositivo portátil de laboratório em disco totalmente integrado para determinação de fosfato em água. Sensores e Atuadores B 246:1085-1091.

[39] ERBERELI, C.R. Desenvolvimento de um imunossensor descartável para o diagnóstico precoce da doença de Alzheimer. São Carlos. 2016.

[40] FARRÉ, M.; KANTIANI, L.; BARCELÓ, D. Advances in immunochemical technologies for analysis of organic pollutants in the environment. TrAC - Trends in Analytical Chemistry, [S. l.], v. 26, n. 11, p. 1100–1112, 2007.

[41] FELIX, F.S.; ANGNES, L. Electrochemical immunosensors – A powerful tool for analytical applications, Biosensors and Bioelectronics, v. 102, P. 470-478, 2018. Disponível em < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566317307583 >. Acesso em 27/03/ 2023

[42] FERREIRA, D. S. C. Desenvolvimento de genossensores para o diagnóstico do Papilomavírus Humano (HPV). Universidade Federal de Pernambuco. 2014. Disponível em: < https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/11899>. Acesso em: 15 ago 2022.

[43] FERREIRA, R. Q.; AVACA, L. A. Determinação eletroquímica da capacidade antioxidante de sucos de frutas industrializadas usando o CRAC assay. Química Nova. v. 31, n. 8, p. 2169-2173. 2008.

[44] FREIRE, R. et al. Direct electron transfer: An approach for electrochemical biosensors with higher selectivity and sensitivity. Journal of the Brazilian Chemical Society, v. 14, n. 2, p. 230-243, mar-apr. 2003.

[45] FRENCH, K.E. Harnessing synthetic biology for sustainable development. Nat Sustain, v.2, p. 250–252 (2019). https://doi.org/10.1038/s41893-019-0270-x

[46] FURTADO, F. R., et al. Aplicações de Biossensores na Análie de Qualidade de Alimentos. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1° ed. (2008), p. 9-12. Acesso em 16 de março. 2023.

[47] FURTADO, R.F. DUTRA, R. A. F.; ALVES, C. R.; PIMENTA, M. G. R.; GUEDES, M. I. F. Aplicações de Biossensores na análise da qualidade de alimentos. I. Furtado, Roselayne Ferro. II. Dutra, Rosa Amália Fireman. III. Alves, Carlucio Roberto. IV. Pimenta, Maria Gardenny Ribeiro Pimenta. V. Guedes, Maria Izabel Florindo – Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2008. 22 p. (Embrapa Agroindústria Tropical. Documentos, 117).

[48] GAVRILAŞ, S.; URSACHI, C.Ş.; PERŢA-CRIŞAN, S.; MUNTEANU, F.D. Recent Trends in Biosensors for Environmental Quality Monitoring. Sensors (Basel). 2022. Disponível em: < https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35214408/ >. Acesso em 31/03/2023.

[49] GBD 2016 Dementia Collaborators. Statistics on the burden of dementia: need for stronger data. 2019. In *The Lancet Neurology. Disponível em:*<https://www.thelancet.com/action/showPdf?pii=S1474-4422%2818%2930456-3>. Acesso em: 11 ago 2022.

[50] GERARD, M.; CHAUBEY, A.; MALHOTRA, B. D. Application of conducting polymers to biosensors. Biosensors & Bioelectronics, v.17, p. 345-359, 2002.

[51] GIL, E. S.; KUBOTA, L. T.; YAMAMOTO, Y. I. Alguns Aspectos de Imunoensaios Aplicados À Química Analítica. Química Nova, v. 22, p. 874 – 881. 1999.

[52] GIROTTI, S.; MAIOLINI, E.; BOLELLI l.; GHINI, S.; FERRI, E. Analytical Techniques and Bioindicators in Environmental Control: Honeybees, Mussels, Bioluminescent Bacteria: Rapid Immunoassays for Pesticide Detection. In: Simeonov, L., Sargsyan, V. (eds) Soil Chemical Pollution, Risk Assessment, Remediation and Security. NATO Science for Peace and Security Series. Springer, Dordrecht, 2008. < https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8257-3_29 >.

[53] GONÇALVES, L. M. et al. Penicillinase-based amperometric biosensor for penicillin G. Electrochemistry Communications, v. 38, p. 131-133, 2014. Acesso em 18 de março. 2023.

[54] GUAN, J. G.; MIAO, Y. Q.; ZHANG, Q. J. Impedimetric biosensors. Journal of Bioscience and Bioengineering. v 97, n. 4, p. 219-26. 2004.

[55] GUTIERREZ, P. L.; NGUYEN, B. In Electrochemistry in Cancer: Applications to Pharmacological Studies of Quinone-containig Antitumor agentes. In Redox Chemistry and Interfacial Behavior of Biological Molecules; Dryhurst, G. Niki, K,. Ed.; Plenum Press; New York, 1988, 369. Acesso em 31 de março. 2023.

[56] GUTIÉRREZ-REBOLLEDO G.A., DRIER-JONAS S., JIMÉNEZ-ARELLANES M.A. Natural compounds and extracts from Mexican medicinal plants with anti-leishmaniasis activity: An update. Asian Pac. J. Trop. Med. 2017.

[57] HAROLD, D. et al. Genome-wide association study identifies variantes at CLU ans PICLAM ssociated with Alzheimer's disease. Nature Genetics, v. 41. 2009.

[58] HARRISON, T.R. Hematologia e Oncologia. Manual de Medicina. 15ª Ed. The McGraw-Hill Companies, Rio de Janeiro, p. 323-324. 2000.

[59] HASHEMI Goradel N, Mirzaei H, Sahebkar A, Poursadeghiyan M, Masoudifar A, Malekshahi ZV, Negahdari B. Biosensors for the Detection of Environmental and Urban Pollutions. J Cell Biochem. 2018 Jan;119(1):207-212. doi: 10.1002/jcb.26030. Epub 2017 May 18. PMID: 28383805. Disponivel em: >https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28383805/<

[60] HOUSSIN, T.; SENEZ, V. Electrochemical Detection. In: BRIDLE, H. (ed.) Waterborne Pathogens Detection Methods and Applications. Academic Press, 2014, p. 147-188.

[61] HOWIE H.L., KATZENELLENBOGEN R.A., GALLOWAY, D.A. Proteínas E6 do papilomavírus. Virologia. 2009.

[62] HUANG, L.; WANG, X.; LIU, S.; GAO, Z. Application of Aptamer-based Biosensor in Bisphenol A Detection, Chinese Journal of Analytical Chemistry, V. 49, p. 172-183, 2021. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1872204020600779 > Acesso em 28/03/2023.

[63] IRITI, M.; BELLI, L.; NALI, C.; LORENZINI, G.; GEROSA, G.; FAORO, F. Ozone sensitivity of currant tomato (Lycopersicon pimpinellifolium), a potential bioindicator species, Environmental Pollution, Volume 141, Issue 2, 2006, Pages 275-282, https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.08.046.

[64] IVNITSKI, D. ABDEL-HAMID, I. ATANASOV, P. WILKINS, E. Review: Biosensors for detection of pathogenic bactéria. 1999 Department of Chemical and Nuclear Engineering, University of New Mexico, Albuquerque, NM 87131, USA

[65] JACOBSON KB. Biosensors and other medical and environmental probes. Available from: http://www.ornl.gov/info/ornlreview/rev29_3/text/ biosens.htm.

[66] JAYANTHI VSA, DAS AB, SAXENA U. Recent advances in biosensor development for the detection of cancer biomarkers. Biosensors and Bioelectronics. 2017; 91:15–23.

[67] KAVATI, E.A. Interação de oncoproteínas viraus E6 e E7 de HPV16/18 com alvos celulares para o desenvolvimento de estratégias terapêuticas. Interunidades Biotecnologia. São Paulo. 2012.

[68] KOKKINOS, C. Electrochemical DNA Biosensors Based on Labeling with Nanoparticles.

Nanomaterials. 2019; v. 9, p. 1361.

[69] KOMAROVA, N.; KUZNETSOV, A. Inside the Black Box: What Makes SELEX Better? Molecules. 2019 Oct 7;24(19):3598. Disponível em: < https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31591283/ >. Acesso em: 28/03/2023.

[70] LAZCKA, O.; DEL CAMPO, F. J.; MUNOZ, F. X. Pathogen detection: a perspective of traditional methods and biosensors. Biosensors & Bioelectronics. v. 22, n. 7, p. 1205 - 1217, 2007.

[71] LI L., ZOU J.-Y., ZHANG L., YOU S.-Y., XIE X., CHEN G.-H. Sensitive detection of the antibiotic pollutants by a solvent-stable luminescent sensor based on a europium(III) metal-organic framework. J. Solid State Chem. 2022.

[72] LI, C.; THOSTENSON, E.T.; CHOU, T.-W. Sensors and actuators based on carbon nanotubes and their composites: A review. Composites Science and Technology, v. 68, p. 1227–1249, 2008.

[73] LIM, J.W.; HÁ, D.; LEE, J.; LEE, S.K.; KIM, T. Review of micro/nanotechnologies for microbial biosensors. Front Bioeng Biotechnol. 2015. Disponível em: < https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26029689/ >. consulta em 26/03/2023.

[74] LIMA J., J. R. et al. Dispositivos sensores eletroquímicos para o diagnóstico do Câncer de Próstata: uma revisão integrativa. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 8, n. 7, p. 49031-49045, 30 jun. 2022.

[75] LUO, J. et al. A new type of glucose biosensor based on surface acoustic wave resonator using Mn-doped ZnO multilayer structure. Biosensors & Bioelectronics, v. 49, p. 512-518, nov. 2013.

[76] MADIGAN, M. T. et al. Microbiologia de Brock - 14ª Edição. Artmed Editora, v.1, f. 516, 2016. 1032 p. Porto Alegre: Artmed, 2016.

[77] MADONG, G.; YANQUING, L.; HONGXIA, G; WU XIAOQIN, W; LIFANG, F. Eletroqchemical detection os shot sequences related to the hepatites B vírus using MB onchitosan-modified CPE. Bioeletrochemistry. 2007.

[78] MAGALHÃES, G. S. L. Síntese e caracterização de polianilina para construção de biossensor eletroquímico. Projeto final de curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Acesso em 31 de março. 2023.

[79] MARCO, M. P.; BARCELÓ, D. Environmental applications of analytical biosensors: Environmental applications. Measurement Science & Technology. v. 7, n. 11, p. 1547 - 1562, 1996OLIVEIRA, A. E. F.; PEREIRA, A. C. Rev. Virtual Quim., 2016. Acesso em: 15 de agosto de 2022. Disponível em: >http://rvq.sbq.org.br/<

[80] MARTINS, B.R. et al. Development of an Electrochemical Immunosensor for Specific Detection of Visceral Leishmaniasis Using Gold-Modified Screen-Printed Carbon Electrodes. NCBI. 2020. Disponível em: < https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7460044/>. Acesso em: 13 ago 2022.

[81] MARTINS, T. D.; RIBEIRO, A. C. C.; CAMARGO, H. S.; FILHO, P. A. C.; CAVALCANTE, H. P. M.; DIAS, D. L. New Insights on Optical Biosensors: Techniques,Construction and Application. INTECH. State of the Art in Biosensors - General Aspects-ch. 5, p. 111-140. 2013.

[82] MATEO, C.; ABIAN, O. FERNÁNDEZ-LAFUENTE, R.; GUISÁN, J. M. Increase in conformational stability of encimes immobilized on epoxy-activated supports by favoring aditional multipoint covalent attachment. Enzyme and Microbial Technology 2000, 26, 509. Acesso em 31 de março. 2023.

[83] MATOS H.J.D., PINTO A.Y.D.N., MIRANDA A.M.M., SILVA F.L.C., RAMOS F.L.P. Cross-reactivity in serological tests between Chagas disease and visceral leishmaniasis in endemic regions for both diseases. Rev. Pan-Amaz. Saúde. 2015.

[84] MATTOS, I. L.; AREIAS, M. C. Automated determination of glucose in soluble coffee using Prussian Blue-glucose oxidase-Nafion® modified electrode. Talanta2005, 15, 1281. Acesso em 31 de março. 2023.

[85] MAXIMIANO, V. R. Estudos das propriedades da Inosina em DNA através do modelo Peyrard-Bishop e análise dos parâmetros termodinâmicos utilizados na predição de estruturas secundárias de RNA. UFMG, Programa de Pós Graduação em Física – Doutorado. 2017. Acesso em 31 de março. 2023.

[86] McNERNEY, M.P.; PIORINO, F.; MICHEL, C.L.; STYCZYNSKI, M.P. Active Analyte Import Improves

the Dynamic Range and Sensitivity of a Vitamin B12 Biosensor. ACS Synth Biol. 2020 Feb 21;9(2):402-411. 2020.

[87] MEDLEY CD, SMITH JE, TANG Z, WU Y, BAMRUNGSAP S, TAN W. Gold nanoparticle-based colorimetric assay for the direct detection of cancerous cells. Anal Chem. 2008;80(4):1067–1072.

[88] Miranda, B.; Rea, I.; Dardano, P.; De Stefano, Luca; Forestiere, C. Recent Advances in the Fabrication and Funcionalization of Flexible Optical Biosensors: Toward Smart Life-Sciences Applications. Biosensors. 2021

[89] Mishra GK, Sharma V., Mishra RK Electrochemical Aptasensors for Food and Environmental Safeguarding: A Review. Biossensores. V. 8, p 28, 2018.

[90] MOHAN S., SRIVASTAVA P., MAHESHWARI S.N., SUNDAR S., PRAKASH R. Nano-structured nickel oxide-based DNA biosensor for detection of visceral leishmaniasis (Kala-azar) Analyst. 2011.

[91] MONOSIK, R.; STREDANSKÝ, M.; STURDIK, E. Biosensors-classification, characterization and new trends. Acta Chim. Slovaca. P. 5:109, 2012.

[92] MORADI M., SATTARAHMADY N., RAHI A., HATAM G.R., SORKHABADI S.M.R., HELI H. A label-free, PCR-free and signal-on electrochemical DNA biosensor for Leishmania major based on gold nanoleaves. 2016.

[93] MORASKIE, M; ROSHID, M.H.O.; O'CONNOR, G.; DIKICI, E.; ZINGG, J.M.; DEO, S.; DAUNERT, S. Microbial whole-cell biosensors: Current applications, challenges, and future perspectives. Biosens Bioelectron. 2021.

[94] MORGAN, C. L.; NEWMAN, D. J.; PRICE, C. P.; Immunosensors: technology and opportunities in laboratory medicine. Clinical Chemistry, v. 42, p. 193-209. 1996.

[95] MURPHY L., Biosensors and bioelectrochemistry, Current Opinion in Chemical Biology, Volume 10, Issue 2, 2006, Pages 177-184. Acesso em 11 de março. 2023.

[96] MURUGAIYAN, S. B. et al. Biosensors in clinical chemistry: An overview. Advanced Biomedical Research, v. 3, n. 67, p. 1-22. 2014.

[97] NAKAMURA, H.; KARUBE, I. Current Research Activity in Biosensors. Analytical e Bioanalytical Chemistry. v. 377, n. 3, p. 446 - 468, 2003.

[98] NAKAMURA, H.; KARUBE, I. Current research activity in biosensors. Anal. Bioanal. Chem. (2003) 377: 446–468

[99] NARESH V, LEE N. A Review on Biosensors and Recent Development of Nanostructured Materials-Enabled Biosensors. Sensors (Basel). 2021 Feb 5;21(4):1109. doi: 10.3390/s21041109. PMID: 33562639; PMCID: PMC7915135.

[100] Nascimento, E.G, de Carvalho GAF, Jardim GPC, Dias JL, Júnior HSF. Epidemiologia do câncer de próstata no Brasil nos últimos 10 anos. Rev de Saúde 2022;13(2);48-52.

[101] NASIR, M.; RAUF, S.; MUHAMMAD, N.; NAWAZ, M.H.; CHAUDHRY, A.A.; MALIK, M.H.; SHAHID, S.A.; HAYAT, A. Biomimetic nitrogen doped titania nanoparticles as a colorimetric platform for hydrogen peroxide detection. J. Colloid Interface Sci. 2017

[102] NAZARETH, J.J.D.O.; GENOVES, L.P.S, Biossensor: Uma evolução biotecnológica no diagnóstico precoce do câncer, Vol.34, n.1, pp.61-68 (Mar - Mai 2021), Brazilian Journal of Surgery and Clinical Research – BJSCR2021. Disponível em:<*20210304_113207.pdf (mastereditora.com.br)> Acesso em 11 de março de 2023.

[103] NAZARETH, JOÃO JÚLIO DORNAS DE OLIVEIRA et al. Biosensor: Uma evolução biotecnológica no diagnóstico precoce do câncer. Brazilian Journal of Surgery and Clinical Research: BJSCR, Belo Horizonte, v. 34, n. 1, p. 61-68, 22 dez. 2020.

[104] NGUYEN, H.H.; KIM, M. An Overview of Techniques in Enzyme Immobilization. Appl. ciência Converg. Tecnol. V. 26 :157–163, 2017. Disponível em: < https://www.e-asct.org/journal/view.html?doi=10.5757/ASCT.2017.26.6.157 >. Acesso em: 25/03/2023.

[105] NGUYEN, H.H.; LEE, S.H.; LEE, U.J.; FERMIN, C.D.; KIM, M. Immobilized Enzymes in Biosensor Applications. Materials (Basel);12(1):121. 2019. Disponível em: < https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6337536/. Acesso em: 26/03/2023.

[106] NORTON, S et al. Potential for primary prevention of Alzheimer's disease: na analysis of population-based data. Lancet Neurology, v. 13, n.8, p. 788-794, 2014.

[107] O que é câncer? [S. l.], 14 jul. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/inca/pt-br/assuntos/cancer/o-que-e-cancer. Acesso em: 18 ago. 2022.

[108] Olaru, A.; Bala, Camelia.; Jaffrezic-Renault, N.; Aboul-Enein, Y.H. Surface Plasmon Resonance (SPR) Biosensors in Pharmaceutical Analysis. Analytical Chemistry. 2015

[109] OLIVEIRA, A. E. F.; PEREIRA, A. C. Biossensores e a Indústria Alimentar – Revisão. Revista Virtual de Química, 2016.

[110] OLIVEIRA, A. E. F.; PEREIRA, A. C. Biossensores e a indústria alimentar-revisão. Revista virtual de Química, v. 8, n. 5, 2016. Acesso em 31 de março. 2023.

[111] OMIDFAR, K.; KHORSAND, F.; AZIZI, M.D. New analytical applications of gold nanoparticles as label in antibody based sensors,Biosensors and Bioelectronics, V. 43, P. 336-347, 2013. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566312009013 > Acesso em: 27/03/2023

[112] ONO A.; TOGASHI, H. Highly selective oligonucleotide-based sensor for mercury (II) in aqueous solutions. Angew. Chem. Int. Ed. 2004. Disponível em: < https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15368377/ >. Acesso em: 30/03/2023.

[113] PAULA, F. S. de et al. Estudo bioeletroquímico de compostos eletrobioativos-relação estrutura-eletroatividade e utilização de biossensor de DNA no estudo de agentes intercalantes e alquilantes de DNA. 2006. Acesso em 31 de março. 2023.

[114] PELTOMAA, R.; GLAHN-MARTINEZ, B.; BENITO-PEÑA, E.; MORENO-BONDI, M. Optical Biosensors for Label-Free Detection of Small Molecules. Sensors. 2018.

[115] PERUMAL, V.: HASHIM, U. Advances in biosensors: Principles, architecture and applications. Journal of Applied Biomedice. v. 12, n. 1, p. 1-15. 2014.

[116] PRAKASH, S.; CHAKRABARTY, T.; SINGH, A.K.; SHAHI, V.K. Polymer thin films embedded with metal nanoparticles for electrochemical biosensors applications. Biosensors and Bioelectronics, v. 41, p. 43–53, 2013.

[117] PRINCE, M., BRYCE, R., ALBANESE R., WIMO, A., RIBEIRO, W., FERRI, CP. A prevalência global de demência: uma revisão sistemática e metanálise. Alzheimer e Demência. 2013.

[118] Proll, G.; Markovic, G.; Fechner, P.; Proell, F.; Gauglitz, G. Reflectometric Interference Spectroscoppy. 2017.

[119] QURESHI, A.; KANG, W.P.; DAVIDSON, J.L.; GURBUZ, Y. Review on carbon-derived, solid-state, micro and nano sensors for electrochemical sensing applications. Diamond and Related Materials, v. 18, p. 1401–1420, 2009.

[120] RAHIMI, P.; JOSEPH, Y. Enzyme-based biosensors for choline analysis: A review, TrAC Trends in Analytical Chemistry, v. 110, p. 367-374, 2019. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016599361830390X?via%3Dihub >. Acesso em: 25/03/2023.

[121] RAMÍREZ, N. B. et al. The evolution and developments of immunosensors for health and environmental monitoring: problems and perspectives. Universidade Federal de Rio de Janeiro, Escola de Química, Laboratório de Biossensores. 2009.

[122] RAMÍREZ-CASTILLO, F.Y.; MURO, A.L.; JAQUES, M.; AVELAR-GONZÁLEZ, F.J.; GARNEAU, P.; HAREL, J.; BARRERA, A.L.G. Patógenos Transmitidos pela água: Métodos de Detecção e Desafios. 2015.

[123] RASSAEI, L.; MARKEN, F.; SILLANPAA, M.; AMIRI, M.; CIRTIU, C.M.; SILLANPAA, M. Nanoparticles in electrochemical sensors for environmental monitoring. Trac Trends in Analytical Chemistry, v. 30, p. 1704–1715 ,2011.

[124] RAY, M., RAY, A., DASH, S., MISHRA, A., ACHARY, K.G., NAYAK, S., SINGH, S. Fungal disease detection in plants: Traditional assays, novel diagnostic techniques and biosensors. Biosens. Bioelectron. 87, 708–723. 2017. Disponível em: >https://doi.org/10.1016/j. bios.2016.09.032<

[125] RAYMUNDO-PEREIRA, P.A.; GOMES, N.O.; MACHADO, S.A.S.; OLIVEIRA, O.N. Simultaneous, ultrasensitive detection of hydroquinone, paracetamol and estradiol for quality control of tap water with a

simple electrochemical method. J. Electroanal. Chem. 2019.

[126] RICCARDI, C. S.; COSTA, P. I.; YAMANAKA, H. Imunossensor Amperométrico. Química. Nova, v. 25, n. 2, p. 316-320, 2002.

[127] RICCI, F.; ADORNETTO, G.; PALLESCHI, G. A review of experimental aspects of electrochemical immunosensors. Electrochimica Acta, v. 84, p. 74–83. 2012.

[128] ROCHA, CAROLINA G. Desenvolvimento de imunossensor impedimétrico para detecção do corante disperso. Araraquara. 2014.

[129] RODRIGUEZ-MOZAZ, S.; MARCO, M.P.; LOPEZ DE ALDA, M. et al. Biosensors for Environmental Monitoring of Endocrine Disruptors: a review article. Anal Bioanal Chem 378, 588–598 (2004). https://doi.org/10.1007/s00216-003-2385-0

[130] ROGERS, K.R. Recent advances in biosensor techniques for environmental monitoring, Analytica Chimica Acta, V. 568, P. 222-231, 2006. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003267006000742 >. Acesso em 27/03/2023.

[131] RON, E. Z. Biosensing environmental pollution. Current Opinion in Biotechnology. v. 18, n. 3, p. 252 - 256, 2007.

[132] ROSATTO, SIMONE S. et al. Biossensores amperométricos para determinação de compostos fenólicos em amostras de interesse ambiental. 2000. Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, SP. Disponível em: https://www.scielo.br/j/qn/a/K8xC3TX6QXRMYCb9MVS7Cnj/?lang=pt>. Acesso em: 08 ago 2022.

[133] SADIK, O. A.; MWILU, S. K.; ALUOCH, A. Smart electrochemical biosensors: from advanced materials to ultrasensitive devices. Electrochimica Acta, v. 55, p. 4287- 4295, 2010.

[134] SAIDUR, M.R.; AZIZ, A.R.A.; BASIRUN, W.J. Recent advances in DNA-based electrochemical biosensors for heavy metal ion detection: A review. Biosens. Bioelectron, v. 90, p. 125–139, 2017.

[135] SANJOSE, S., QUINT, W.G., ALEMANY L, GERAETS D.T, KLAUSTERMEIER, J.E, LLOVERAS, B. et al. Atribuição do genótipo do papilomavírus humano no câncer cervical invasivo: um estudo transversal retrospectivo em todo o mundo. Lancet Oncol. 2010.

[136] SANTANA, L.K.L. et al. Imunossensores eletroquímicos e suas aplicações. Scientia Amazonia, v. 6, n. 1, 31-41, 2017.

[137] SANTOS, A. N. Aspectos bioeletroquímicos de dendrímeros como nanoplataformas para aplicações clínicas. 2008. Acesso em 31de março. 2023.

[138] SANTOS, CINTHYA M. L. Desenvolvimento de um biossensor amperométrico de DNA para detecção do Papilomavírus humano. Universidade Federal de Pernambuco. CCB. Ciencias Biológicas. 2008.

[139] SANTOS, S.M.A. & RIFIOTIS, T., Cuidadores familiares de idosos dementados: Uma reflexão sobre o cuidado e o papel dos conflitos na dinâmica da família cuidadora. In: SIMSON, O.R.M.V.; NERI, A.L.; CACHIONI, M. (Org.) As múltiplas faces da velhice no Brasil. Editora Alínea. 2003.

[140] SASSOLAS, A.; BLUM, L.; LECA-BOUVIER, B. Immobilization strategies to develop enzymatic biosensors. Biotechnology Advances, v. 30, n. 3, p. 489-511, mai. 2012.

[141] SEKLI BELAÏDI, F.; FAROUIL, L.; SALVAGNAC, L.; TEMPLE-BOYER, P.; SÉGUY, I.; HEULLY, J.L.; ALARY, F.; BEDEL-PEREIRA, E.; LAUNAY, J. Towards integrated multi-sensor platform using dual electrochemical and optical detection for on-site pollutant detection in water. Biosens. Bioelectron. v.132, p. 90–96, 2019.

[142] SHARMA, S.; BYRNE. H.; O'KENNEDY, R.J. Antibodies and antibody-derived analytical biosensors. Essays Biochem, v. 60(1), p. 9-18. 2016. Disponível em: < https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27365031/ >. Acesso em 27/03/2023.

[143] SILVA, L. M. C. Desenvolvimento de biossensores eletroquímicos para fenol e ureia com foco na aplicação ambiental. Escola de Química. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011.

[144] SOARES, A. C. Filmes nanoestruturados aplicados em Biossensores para detecção precoce de câncer de pâncreas. Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Novais de Oliveira Junior. 2016. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

[145] SOARES, C. A. et al. Microfluidic-Based Genosensor To Detect Human Papillomavirus (HPV16) for Head and Neck Cancer. Applied Materials & Interfaces. 2018. Disponível em: <https://portal.if.usp.br/ifusp/sites/portal.if.usp.br.ifusp/files/acsami.8b14632%286%29.pdf>. Acesso em: 15 ago 2022.

[146] SOHEILI M, KEYVANI H, SOHEILI M, NASSERI SH. Vírus do papiloma humano: Um estudo de revisão de epidemiologia, carcinogênese, métodos de diagnóstico e tratamento de todos os cânceres relacionados ao HPV. 2021. *Med J Islam Repub Irã*. Disponível em: <https://www-ncbi-nlm-nih-gov.translate.goog/pmc/articles/PMC8278030/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt-BR&_x_tr_pto=sc>. Acesso em 15 ago 2022.

[147] SONG, S.; XU, H.; FAN, C. Potential diagnostic application os biosensors: current and future directions. International Journal of Nanomedicine. v. 1, n. 4, p. 433-40. 2006.

[148] SOPER SA, BROWN K, ELLINGTON A, FRAZIER B, GARCIA MANERO G, GAU V, et al. Point-of-care biosensor systems for cancer diagnostics/prognostics. Biosensors and Bioelectronics. 2006; 21(10):1932–42.

[149] SOPER, S. A., BROWN, K., ELLINGTON, A., FRAZIER, B., GARCIA-MANERO, G., GAU, V., WILSON, D. (2006). Point-of-care biosensor systems for cancer diagnostics/prognostics. Biosensors and Bioelectronics, 21(10), 1932–1942. doi: 10.1016/j.bios.2006.01.006

[150] SORENSEN, M.; AUTRUP, H.; MOLLER, P.; HERTEL, O.; JENSEN, S. S.; VINZENTS, P.; KNUDSEN, L. E.; LOFT, S. Linking exposure to environmental pollutants with biological effects. Mutation Research. v. 544, n. 2-3, p. 255 - 271, 2003.

[151] SOTO, G. A. M.; JAFFARI, S. A.; BONE, S. Characterisation and optimisation of AC conductimetric biosensors. Biosensors & Bioelectronics, v. 16, p. 23-29, 2001. Acesso em 15 de março. 2023.

[152] SOUZA GCS, SILVA ER, MACÊDO FLS, SOARES LRC, ROSAL VMS, ROCHA MGL. Papilomavírus humano: biologia viral e carcinogênese. FEMINA, vol 43, n 4. 2015.

[153] SOUZA, L. T., et al. Imobilização enzimática: princípios fundamentais e tipos de suporte. 2017. Acesso em 31 de março. 2023.

[154] SUSANTO, H. et al. Immobilization of glucose oxidase on chitosan-based porous composite membranes and their potential use in biosensors. Enzyme and Microbial Technology, v. 52, n. 6-7, p. 386-392, mai. 2013.

[155] TARLEY, C. R. T.; SOTOMAYOR, M. D. T.; KUBOTA, L. T. Polímeros biomiméticos em química analítica. Parte 1: preparo e aplicações de MIP ("Molecularly Imprinted Polymers") em técnicas de extração e separação. Química Nova. v. 28, n. 6, p. 1076 - 1086, 2005.

[156] TELES F. S. R. R. Desenvolvimento de um biossensor para detecção e identificação do vírus da dengue em fluídos biológicos – Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco. CCB. Ciências Biológicas, 2006. Acesso em 16 de março. 2023.

[157] THAMBISETTY, M et al. Association of plasma clusterin concentration with severity, phatology, and progression in Alzheimer disease. Archives of General Psychiatry, v. 67, n. 7. 2010.

[158] THÉVENOT, D. R.; TOTH, K.; DURST, R. A.; WILSON, G. S. Electrochemical biosensors: recomended definitions and classification. Biosensors & Bioelectronics, v. 16, p. 121-131, 2001. Acesso em 15 de março. 2023.

[159] THÉVENOT, H.; O´KENNEDY, R. Advances in biosensors for detection of pathogens in food and water. Enzyme and Microbial Technology. 2013. 32, 3.

[160] TIAN, F. GOURINE, A.V.; HUCKSTEPP, R.T.R.; DALE, N. A microelectrodebiosensor for real time monitoring of L-glutamate release. Analytica ChimicaActa, v. 645, n. 1-2, p. 86–91, 2009. Acesso em 31 de março. 2023.

[161] TOTHILL IE, Turner APF. Bionsensors. In: Caballero B, Trugo L, FINGLAS P, editors. Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition. New York, NY: Academic Press; 2003:489–499.

[162] TOTHILL IE. Biosensors for cancer markers diagnosis. In: Seminars in cell & developmental biology. Elsevier; 2009; 55–62.

[163] TSIERKEZOS, N. G.: KNAUER, A.; RITTER, U. Thermodynamic investigantion of

ferrocyanide/ferricyanide redox system on nitrogen-doped multi-walled carbono nanotubes decorated with gold nanoparticles. Thermochimica Acta, v. 576, p. 1-8. 2014.

[164] TURNER A. P. F.; KARUBE I.; WILSON S. W. (1986). Biosensors. Fundamentals and Applications. Oxford Science Publications, Oxford. Acesso em 31 de março. 2023.

[165] VAN DER MEER, J.R.; BELKIN S, Onde a Microbiologia Encontra a Microengenharia: Design e Aplicações de Bactérias Repórteres. Nature Reviews Microbiology, v. 8 (7), p. 511–522, 2010.

[166] VENA, M.P.; JOBBAGY, M.; BILMES, S.A. Microorganism mediated biosynthesis of metal chalcogenides; a powerful tool to transform toxic effluents into functional nanomaterials. Sci. Total Environ. V. 565, p. 804–810, 2016.

[167] VÖRÖSMARTY, C.; MCINTYRE, P.; GESSNER, M. et al. Global threats to human water security and river biodiversity. Nature, v.467, P. 555–561 (2010). https://doi.org/10.1038/nature09440

[168] WANG, K.; TAO, Z. H.; XU, L.; LIU, Y. Q. Research and Development of Functionalized Aptamer based Biosensor. Chin. J. Anal. Chem. v. 42: p. 298–304, 2014.

[169] WANG, Q.; WANG, J.; HUANG, Y.; DU, Y.C.; ZHANG, Y.; CUI, Y.X.; KONG, D.M. Development of the DNA-based biosensors for high performance in detection of molecular biomarkers: More rapid, sensitive, and universal. Biosens. Bioelectron. 2022

[170] WANG, T.; CHEN, C.; LARCHER, L.M, BARRERO, R.A.; VEEDU, R.N. Three decades of nucleic acid aptamer technologies: Lessons learned, progress and opportunities on aptamer development. Biotechnol Adv, V. 37(1), p 28-50, 2019.

[171] XIONG, J.; SUN, Z.; YU, J.; LIU, H.; WANG, X. Thermal self-regulatory smart biosensor based on horseradish peroxidase-immobilized phase-change microcapsules for enhancing detection of hazardous substances,Chemical Engineering Journal, V. 430, Part 3, 2022.

[172] YAKOVLEVA, M.; BHAND, S.; DANIELSSON, B. The enzyme thermistor-A realistic biosensor concept. A critical review. Analytica Chimica Acta, v. 766, p. 1-12, mar. 2013.

[173] YANG, S.; LIU, M.; DENG, F.; MAO, L.; YUAN, Y.; HUANG, H.; CHEN, J.; LIU, L.; ZHANG, X.; WEI, Y. Biomimetic modification of silica nanoparticles for highly sensitive and ultrafast detection of DNA and Ag+ ions. Appl. Surf. Sci. 2020

[174] ZHANG, S.Q.; LIN, F.F.; YUAN, Q.P.; LIU, J.W.; LI, Y.; LIANG, H. Robust magnetic laccase-mimicking nanozyme for oxidizing o-phenylenediamine and removing phenolic pollutants. J. Environ. Sci. v. 88, p. 103–111, 2020.

[175] ZHAO, Y.; WANG, Y.; PI, K. CAPPELLEN, P.V. Deployment of functional DNA-based biosensors for environmental water analysis. Science Direct, 2022.

Capítulo 5

Projeto, construção e caracterização da Bobina de Rogowski com diferentes números de voltas: uma análise comparativa por meio de ensaios laboratoriais

Erika Brito Correia
Leonardo Souza Caires
Ítalo Cardoso Mota
Diego Habib Santos Nolasco

Resumo: Este trabalho tem como finalidade realizar o projeto e a construção de dois protótipos da bobina de Rogowski. Este método é caracterizado por sua capacidade de medição não invasiva (sem contato físico com o condutor), destacando-se pela sua notável aplicabilidade em uma ampla gama de frequências e pela sua resistência a interferências eletromagnéticas. Sendo assim, foram fabricadas duas bobinas de Rogowski, uma com 800 espiras e outra com 1550 espiras. Deste modo, comparou-se a sensibilidade e suas faixas de atuação. O trabalho investigou como a variação no número de espiras impactou na relação entre os valores de corrente elétrica e tensão medidos, sendo uma consideração essencial para a aplicação da bobina em diferentes cenários. Para atingir os objetivos, foram conduzidos experimentos sistemáticos envolvendo diferentes valores de corrente elétrica, a fim de examinar o comportamento das bobinas. De modo a contribuir para mitigar os efeitos de quaisquer ruídos de leitura, utilizou-se um filtro passa-baixa após cada uma das bobinas. Portanto, o presente trabalho apresenta os fundamentos teóricos subjacentes a operação da bobina de Rogowski, detalha a metodologia experimental adotada e realiza analises dos resultados obtidos nas medições em laboratório. Esta abordagem proporciona meios essenciais para a aplicação eficaz dessa tecnologia tanto no contexto industrial quanto científico.

Palavras-chave: medição de corrente elétrica, bobina de rogowski, sensibilidade, faixa dinâmica, método de medição não intrusivo, interferência eletromagnética.

1. INTRODUÇÃO

A bobina de Rogowski oferece vantagens notáveis para medições de correntes transitórias e pulsadas, apresentando resposta linear e imunidade relativamente alta a interferência eletromagnética. Apresenta-se, portanto, como uma forma de medição de corrente elétrica em aplicações industriais, de pesquisa e de controle, destacando-se como um método sem contato físico (não invasivo) e com ampla capacidade de atuação em diversas frequências.

Um fator construtivo crucial na utilização eficaz da bobina de Rogowski e o número de voltas da bobina, que influencia diretamente em sua sensibilidade e em sua faixa dinâmicas de atuação. A sensibilidade e diretamente responsável por converter variações de corrente em sinais de tens ao mensuráveis e a faixa dinâmicas tem finalidade relacionada a capacidade de medição de correntes sem saturação. Ambas são diretamente afetadas pelo número de espiras utilizado.

Neste estudo, emprega-se uma análise minuciosa sobre o impacto da variação do número de espiras na bobina de Rogowski na relação entre a corrente de entrada e a medida resultante em forma de tensão elétrica. Compreender essa relação desempenha um papel fundamental na otimização do projeto e na operação da bobina de Rogowski em uma variedade de contextos de aplicação. Foram confeccionados dois protótipos: um equipado com 800 espiras e outro com 1550 espiras. Estas bobinas foram submetidas a experimentos sistemáticos, nos quais a corrente de entrada foi variada em ambas, visando analisar de que maneira essa variação afetava ambas as sensibilidades, as faixas dinâmicas e outros aspectos de relevância inerentes ao dispositivo de medição.

Inicialmente foram abordados a fundamentação teórica da bobina de Rogowski, descrevendo sua operação e princípios de funcionamento. Em seguida, detalha-se a metodologia experimental empregada para avaliar a influência do número de voltas na relação entre corrente e tensão. Finalmente, apresenta-se os resultados obtidos, fornecendo as percepções encontradas.

2. DESENVOLVIMENTO TEORICO

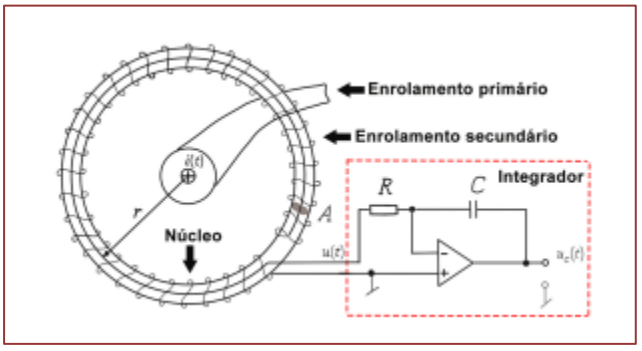
2.1. BOBINA DE ROGOWSKI

A Bobina de Rogowski, nomeada em homenagem a Walter Rogowski, e essencialmente um solenoide toroidal com núcleo de ar ou de material não ferromagnético que rodeia um condutor no qual circula a corrente que se pretende medir. Seu princípio de funcionamento está baseado na Lei de Faraday-Lenz [1], a qual afirma que a fem induzida tem valor igual ao modulo da derivada temporal do fluxo magnético e sinal contrário ao da taxa de variação do fluxo e também na lei de indução magnética que relaciona à força eletromotriz induzida com a taxa de variação do fluxo magnético no tempo [2]. A bobina está acoplada magneticamente ao condutor, devido a presença de uma corrente elétrica variável no tempo [3].

A figura 1 apresenta o modelo da bobina de Rogowski utilizada neste trabalho. Pode-se observar o condutor primário e o enrolamento da bobina (condutor secundário) com um núcleo feito de um material não ferromagnético. A tensão no terminal de saída da bobina e diretamente proporcional a derivada da corrente que circula no condutor medido. Dessa maneira, nessa etapa de aquisição, tornou-se necessário a utilização de um circuito

integrador, destacado em vermelho, para obter-se um sinal proporcional a corrente do condutor.

Figura 1: Bobina de Rogowski

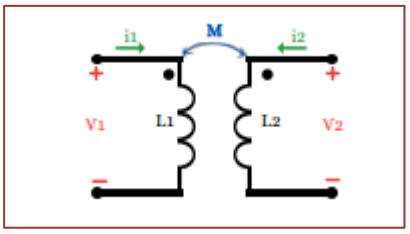


Fonte: Elaborado pelos autores.

A bobina de Rogowski possui as seguintes vantagens: (i) não saturação magnética, (ii) pode ser instalada em locais de difícil acesso, (iii) medição de corrente elétrica mesmo onde exista uma elevada diferença de potencial e (iv) baixa perdas [4]. Entretanto, as desvantagens englobam a dependência de um enrolamento secundário e a limitaçao da corrente a ser medida [4].

E interessante destacar que condutor e bobina formam um circuito magneticamente acoplado, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Modelo de acoplamento magnético



Fonte: Elaborado pelos autores.

Uma análise circuital da Figura 2 apresenta-se em forma de um sistema de equações lineares, relacionando corrente, tensão, indutância e indutância mútua, conforme apresentado abaixo:

$$\begin{cases} V_1(t) = L_1 \dfrac{d}{dt} i_1(t) + M \dfrac{d}{dt} i_2(t) \\ V_2(t) = L_2 \dfrac{d}{dt} i_2(t) + M \dfrac{d}{dt} i_1(t) \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

V (t): e a tens ao no enrolamento (o índice 1 se refere ao enrolamento, condutor ou barramento primário e o 2 ao secundário);

L: e a indutância própria do enrolamento;

$\frac{d}{dt}i(t)$e a taxa de variação no tempo da corrente no enrolamento;

M: é a indutância mútua entre o condutor e o enrola- mento secundário.

É importante notar que a corrente no enrolamento secundário (bobina de Rogowski) não vai existir, pois este e mantido em aberto, consequentemente, $i_2(t) = 0$ e, além disso, M e invariável no tempo, assim, pode-se obter a equação 2.

$$v_2(t) = M\frac{d}{dt}i_1(t) \qquad (2)$$

Pela equação 2, nota-se que a fem induzida no enrolamento secundário da Bobina de Rogowski, $v_2(t)$, em volts (V), e proporcional a indutância mútua entre o condutor e o enrolamento, M, em Henry (H), e a taxa de variação no tempo da corrente elétrica no condutor, em $A \cdot s^{-1}$.

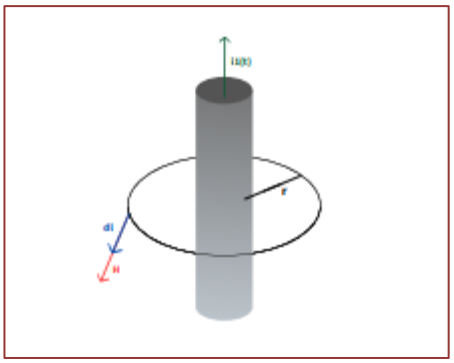
Dessa forma, tem-se duas alternativas de desenvolvimento para se encontrar o fluxo magnético que passa pela bobina. Uma delas e o desenvolvimento a partir da Lei Circuital de Ampere, no qual e feita uma aproximação, considerando o condutor com um comprimento infinito e a outra e o desenvolvimento a partir da Lei de Biot-Savart, de onde se encontra uma expressão mais genérica para o fluxo magnético no interior do enrolamento secundário da Bobina de Rogowski para qualquer comprimento de condutor (enrolamento primário), mas ao considera-se um condutor infinito o resultado será o mesmo que a demonstração anterior [5].

2.2. DESENVOLVIMENTO A PARTIR DA LEI CIRCUITAL DE AMPERE

Na forma integral, a Lei Circuital de Ampere descreve que a corrente elétrica que circula em um condutor forma um campo magnético com intensidade H(t), como explicitado pela equação 3. Ciente de que a corrente elétrica circula no condutor primário e que o angulo entre o vetor de intensidade magnética e o vetor diferencial de comprimento do condutor e igual a 0°, conforme ilustrado na Figura 3, e possível verificar que:

$$\oint H \cdot dl = i_1(t) \qquad (3)$$

Figura 3: Angulo entre os vetores intensidade magnética e diferencial de comprimento



Fonte: Elaborado pelos autores.

A intensidade de campo magnético pode ser encontrada somando-se todas as contribuições dos elementos diferenciais $d\vec{l}$ da Equação 3. Mas o vetor elemento diferencial de comprimento pode ser dado por $d\vec{l}$ = rdθ. Assim, tem-se que, fora do condutor, $\vec{H}$ (t) é calculada pela equação 4:

$$H(t) = \frac{1}{2\pi r} i_1(t) \qquad (4)$$

Onde:

r → e o raio entre o primário e o secundário (m).

A ausência de um núcleo ferromagnético na Bobina de Rogowski permite a manutenção de sua linearidade, visto que seu núcleo e formado por um meio linear, como o ar, que possui permeabilidade μo = 4π 10^{-7} (H/m), sendo a mesma, permeabilidade magnética do espaço livre. O módulo da densidade de fluxo magnético, B(t), pode ser encontrado pela equação 5:

$$B(t) = \mu_o H(t) \qquad (5)$$

Substituindo a equação 4 na equação 5, o módulo da densidade de fluxo magnético também pode ser obtido pela equação 6:

$$B(t) = \frac{\mu_o}{2\pi r} i_1(t) \qquad (6)$$

O fluxo magnético pode ser calculado pela equação 7:

$$\Phi(t) = B(t) \cdot S \qquad (7)$$

Onde:

S → é a área, em m^2, que envolve a densidade de fluxo magnético.

Considerando que o enrolamento secundário da Bobina de Rogowski tem formato circular, possui um raio r_s, e que seu centro está a uma distância r do condutor primário,

a área do enrolamento secundário que envolve a densidade de fluxo magnetico é igual a área de um círculo que será:

$$S = \pi r_s^2 \qquad (8)$$

Logo, substituindo as equações 6 e 8 na equação 7 o fluxo magnetico ser a determinado por meio da Equação 9.

$$\Phi(t) = \frac{\mu_o r_s^2}{2r} i_1(t) \qquad (9)$$

2.3. DESENVOLVIMENTO A PARTIR DA LEI DE BIOT-SAVART

A Lei de Biot-Savart permite calcular, em qualquer ponto do espaço, a densidade do campo magnetico originado por uma corrente elétrica que passa em um condutor. A Bobina de Rogowski não possui núcleo ferromagnético. Assim, no espaço livre, a corrente elétrica i_1(t) que circula em um comprimento elementar dl do condutor (enrolamento primário) orientado no sentido da corrente, origina, no ponto P_2 do enrolamento secundário, que está a uma distância R de dl, uma densidade de campo magnetico elementar dB(t) que é dada pela equação 10:

$$dB(t) = \frac{\mu_o i_1(t) dl \times a_R}{4\pi |R^2|} \qquad (10)$$

Onde:

$a_R \rightarrow$ e o vetor unitário na direção do vetor R. O fluxo magnetico pode ser calculado pela utilização da equação 11:

$$\Phi(t) = \frac{\mu_o i_1(t) r_s^2}{4r} \left[\frac{L}{\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + r^2}} \right] \qquad (11)$$

A equação 11 representa uma expressão genérica para o fluxo magnético no interior do enrolamento secundário da Bobina de Rogowski para qualquer comprimento l de condutor (enrolamento primário). Para L >> r, o condutor pode ser considerado de comprimento infinito. Deste modo, tomando-se o limite da equação com l tendendo ao infinito, a equação pode ser visto na equação 12:

$$\lim_{L \to \infty} \Phi(t) = \frac{\mu_o i_1(t) r_s^2}{4r} \left[\frac{\frac{2L}{L}}{\sqrt{\frac{L^2}{L^2} + \frac{4r}{L^2}}} \right] = \frac{\mu_o r_s^2}{2r} i_1(t) \qquad (12)$$

2.4. RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E CORRENTE ELÉTRICA

Utiliza-se o desenvolvimento a partir da Lei de Biot-Savart, encontrou-se uma expressão genérica para o fluxo magnetico no interior do enrolamento secundário do transdutor e, aplicando-se a aproximação do condutor ter comprimento infinito, chegou-se ao mesmo resultado do desenvolvimento a partir da Lei Circuital de Ampere. A partir da determinação do fluxo magnetico no interior do enrolamento secundário da Bobina de Rogowski utilizando a Lei de Biot-Savart, pode-se encontrar a relação entre a tensão no secundário do transdutor, v2(t), e a corrente elétrica no condutor $i_1(t)$.

De tal forma, em modulo e considerando o fluxo magnetico para um condutor de comprimento L qualquer, tem-se:

$$v_2(t) = N\frac{\mu_o r_s^2}{4r}\frac{L}{\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + r^2}}\frac{d}{dt}i_1(t) \qquad (13)$$

Resolvendo a equação 13 para $i_1(t)$, a corrente elétrica no condutor será dada pela equação 14:

$$i_1(t) = \left[N\frac{\mu_o r_s^2}{4r}\left(\frac{L}{\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + r^2}}\right)\right]^{-1} \cdot \int v_2(t)dt \quad (14)$$

3. DIMENSIONAMENTO TEÓRICO DO PROTÓTIPO

Este trabalho e fruto de um rigoroso processo experimental que envolveu manipulação e testes ao longo de seu desenvolvimento. No âmbito de uma análise comparativa, foram construídas duas bobinas de Rogowski com o intuito de possibilitar a comparação dos resultados obtidos em ambos os casos. Em seguida, procedeu-se a seleção dos materiais a serem aplicados e ao dimensionamento dos protótipos, conforme detalhado na seção subsequente.

E relevante notar que o laboratório utilizado para a realização dos experimentos tinha uma capacidade máxima de fornecer 5A de corrente, que era limitada pelo autotransformador variável (VARIAC). Para contornar essa restrição, empregou-se a estratégia de incorporar bobinas em várias voltas de cabos condutores, simulando assim um sistema que demandaria uma corrente elétrica mais elevada.

3.1. PROTÓTIPO DA BOBINA DE ROGOWSKI 800 VOLTAS

Para a construção da bobina de Rogowski foi escolhido uma mangueira de PVC de uso doméstico, pela necessidade de se ter um núcleo ar, e por se tratar de um material não magnetico tendo flexibilidade para atingir o formato toroidal.

Já a composição das espiras foi escolhido utilizar um fio de 28 AWG (American Wire Gauge) pois ele possui um calibre pequeno, 0.32mm de diâmetro, possibilitando o

enrolamento completo do núcleo sem se romper, e por suportar correntes de até 230mA de acordo com sua fabricação por isso experimentalmente adotou-se esse fio.

A dedução matemática para o dimensionamento do número de voltas foi apresentada no desenvolvimento teórico a partir da Equação 13. Dessa forma, após o algebrismo matemático encontra-se a seguinte Equação:

$$N = \frac{2r}{\mu_o r_s^2} \frac{\varepsilon_p}{\pi f l_p} \frac{\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + r^2}}{L} \qquad (15)$$

em que:

- N é o número de voltas da bobina;
- ε_p é a força eletromotriz do primário (V);
- r é o raio entre o primário e o secundários (m);
- L é o comprimento do condutor primário (m);
- r_s é o raio do secundário (núcleo da bobina) (m);
- μ0 é a permeabilidade magnética no espaço livre [H/m];
- f é a frequência;
- *Ip* é a corrente de pico (A).

Neste trabalho foi idealizado, inicialmente, a realização da primeira bobina com valor maximo de corrente igual a $155A_{rms}$. Os parâmetros foram escolhidos experimentalmente e por meio do estudo de bobinas comerciais.

Deste modo, utilizou-se a Equaçao15 para calcular o número de espiras necessárias de maneira que a bobina funcione nos parâmetros indicados. Com isso, as grandezas adotadas estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1: Dados para o cálculo do número de voltas da bobina

ε	0,06Vp = 60mVp
f	60 Hz
L	1 m
r	0,045 m
μo	$4\pi 10^{-7}$ H/m
rs	0,00810 m

É importante ressaltar que o valor de r_s foi determinado pelo núcleo escolhido: uma mangueira com cerca de 2. Π. 0, 045 = 28 cm de comprimento. A partir das considerações acima pode-se calcular o valor de N teórico, sendo:

$$N = \frac{2 \cdot 0,045}{4\pi 10^{-7} \cdot 0,00810^2} \frac{0,06}{\pi 60 \cdot 155\sqrt{2}} \frac{\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + 0,045^2}}{1}$$

$$N \cong 800 \text{ espiras}$$

Diante disso, o valor encontrado foi de aproximadamente 800 espiras para que a bobina de Rogowski funcione adequadamente nos padrões definidos

3.2. PROTÓTIPO DA BOBINA DE ROGOWSKI 1550 VOLTAS

A segunda bobina, por sua vez, foi projetada considerando os mesmos parâmetros da Tabela 1, porém para um valor máximo de corrente igual a 80A_{rms}. Logo,

$$N = \frac{2 \cdot 0,045}{4\pi 10^{-7} \cdot 0,00810^2} \frac{0,06}{\pi 60 \cdot 80\sqrt{2}} \frac{\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + 0,045^2}}{1}$$

$$N \cong 1550 \text{ espiras}$$

A partir da Equação 15, torna-se evidente que à medida que a corrente do primário I_p diminui, o número de voltas N aumenta. De maneira análoga a relação entre o raio do núcleo r_s e inversamente proporcional ao número de espiras N. Dado que existem limitações para a obtenção de valores de corrente no laboratório utilizado para testes e considerando questões de segurança, não era aconselhável criar uma bobina para medir altas correntes. Portanto, a abordagem preferida para a construção de uma bobina com um valor de corrente e um número de voltas relativamente baixo foi a utilização de um núcleo de polietileno com um diâmetro maior do que o normalmente encontrado em bobinas convencionais.

A escolha de empregar uma mangueira também é justificada pelo formato e pelo material, uma vez que possui uma seção circular, além de resistência e flexibilidade. Essa última característica contribui para o desenvolvimento de uma bobina não invasiva, ou seja, um dispositivo no qual não é necessário interromper o circuito para realizar a medição.

3.3. DIMENSIONAMENTO DO AMPLIFICADOR INTEGRADOR/FILTRO PASSA-BAIXA

Diante da necessidade de atenuação do ruído na saída do sistema, foi imprescindível a utilização de um filtro que contribuísse na tentativa de se conseguir uma melhor qualidade de sinal. Com isso, foi escolhido a topologia de filtro passa-baixa, com o intuito de eliminar frequências mais altas do sinal a partir da denominada frequência de corte. Para tanto, o circuito foi montado por meio do amplificador operacional 741, um circuito integrador. A partir disso, foram feitos os cálculos para modelar o sistema e os componentes discretos ´ através da equação 16.

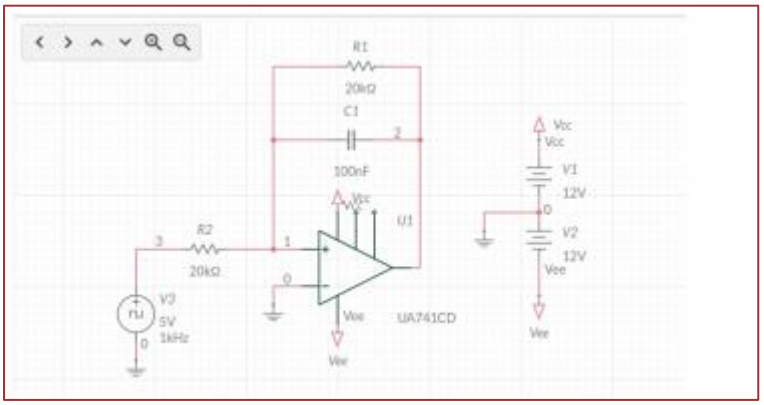
$$R_f = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \tag{16a}$$

$$V_{in} = R_1 \cdot I_{in} \tag{16b}$$

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} \tag{16c}$$

A figura 4 representa a simulação do circuito integrador utilizado como amplificador operacional.

Figura 4: Circuito amplificador integrador/Filtro passa-baixa



Fonte: Elaborado pelos autores.

Dessa maneira, foi definido uma frequência de corte como 80 Hz, próximo da frequência de 60 Hz desejada, frequência apresentada no sinal da rede de energia elétrica no Brasil. Assim, faltava a definir o capacitor que estaria presente na realimentação negativa do amp. op. e o resistor de referência que seria utilizado para descarga do capacitor em paralelo com este. De acordo com as dificuldades para encontrar variados valores de capacitor, definiu-se o capacitor como 100 nF para que o resistor pudesse ser variável que definisse o cálculo. Seguindo a equação acima, chegamos no resistor de referência, o valor encontrado foi de 20KΩ.

Assim, para finalizar a montagem, calculou-se o resistor que estaria na entrada do circuito. Este resistor define, por meio da razão do resistor de referência por ele, o valor de ganho de tensão identificada no canal 6 do 741. Colocamos assim um ganho unitário de tensão, logo o valor deste resistor seria igual ao resistor de referência, ou seja, 20KΩ.

3.4. MATERIAIS APLICADOS E PROCESSO DE CONSTRUÇÃO

Para a realização da montagem da bobina de Rogowski foi necessário a utilização de materiais específicos e apropriados para ser possível o perfeito funcionamento dos equipamentos desenvolvidos.

3.4.1. BOBINA DE ROGOWSKI

Na construção das bobinas de Rogowski se fez necessário a utilização de materiais para compor o protótipo e para auxiliar na construção, sendo:

- Mangueira de PVC com comprimento de 100 cm;
- Fio de cobre esmaltado AWG 28 rolo com 250g;
- Fita isolante.

Com a realização do dimensionamento devidamente feito e definido a quantidade de voltas necessárias foi fixado a ponta do fio de cobre esmaltado em uma das extremidades e dado início ao enrolamento do mesmo envolta da mangueira até a outra extremidade, evitando deixar espaços entre as voltas. Após esse processo finalizado foi recortado as pontas excedentes e feita a fixação de ambas as extremidades com fita isolante. Alcançando o resultado conforme as Figuras 5 e 6 .

Figura 5: Montagem do Bobina de Rogowski 800 espiras

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 6: Montagem do Bobina de Rogowski 1550 espiras

Fonte: Elaborado pelos autores.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção, apresenta-se os resultados obtidos a partir da coleta de dados utilizando duas bobinas de Rogowski, uma com 800 voltas e outra com 1550 voltas, em diferentes níveis de corrente de entrada. O objetivo principal foi analisar como a variação do número de voltas na bobina de Rogowski afeta a relação entre a corrente de entrada e a medida de

tensão. A Figura 7 ilustra a disposição experimental implementada em ambas as bobinas, que contribuiu com a validação dos protótipos construídos.

Figura 7: Disposição experimental

Fonte: Elaborado pelos autores.

Nas Tabelas 2 e 3, são compostas pelos dados coletados de diferentes valores de correntes e tensões durante a realização dos experimentos empregando as bobinas de Rogowski. Os resultados indicam uma intrincada interligação entre a corrente de entrada e a magnitude da tensão registrada, sendo essa última medida em milivolts (mV).

Tabela 2: Relação de corrente e RMS na bobina de 1550 espiras

Bobina – 1550 voltas	
Corrente de Entrada RMS	Tensão RMS
1,0A	16mV
1,9A	32mV
2,5A	40mV
2,9A	48mV
3,3A	52mV
3,6A	56mV
3,9A	64mV
4,2A	68mV
4,5A	72mV
4,8A	76mV

Fonte: Elaborado pelos autores.

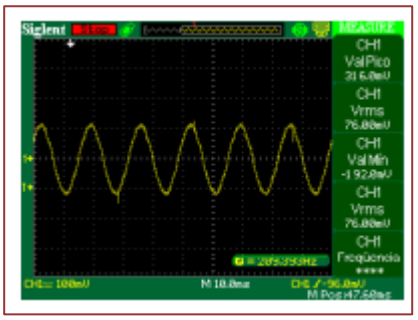
Nota-se de maneira evidente que, para ambos os conjuntos de bobinas, a elevação na corrente de entrada se manifesta uma intuitivamente direta com a observada na magnitude da tensão registrada. Este achado é notável, sugerindo uma característica linear subjacente nos sistemas em análise, como pode ser observado nas Figuras 8 e 9.

Tabela 3: Relação de corrente e RMS na bobina de 800 espiras

Bobina – 800 voltas	
Corrente de Entrada RMS	Tensão RMS
1,0A	12mV
1,9A	20mV
2,5A	24mV
2,9A	28mV
3,3A	32mV
3,6A	36mV
3,9A	40mV
4,2A	44mV
4,5A	48mV
4,8A	52mV

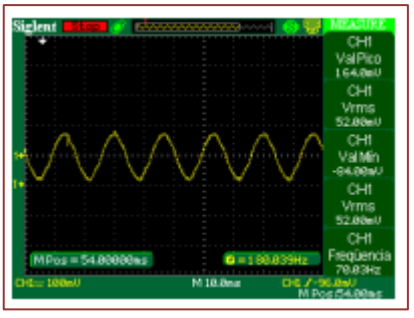
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 8: Sinal de saída da bobina de 1550 espiras com filtro passa-baixa



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 9: Sinal de saída da bobina de 800 espiras com o filtro passa-baixa



Fonte: Elaborado pelos autores.

Este entendimento corrobora com achados prévios na literatura, indicando uma revisão com os princípios fundamentais do eletromagnetismo. A relação intrínseca entre a corrente elétrica e o campo magnetico, conforme expresso pela lei de Ampére, e um fator central na compreensão dos resultados obtidos.

É importante observar que os resultados aqui apresentados foram obtidos em condições controladas de laboratório. Para mitigar influências externas, foi empregado um

amplificador integrador/filtro passa-baixa para suprimir ruídos externos. Além disso, as caraterísticas específicas das bobinas de Rogowski utilizadas, como diâmetro, material e geometria, podem exercer influência sobre os resultados e, portanto, devem ser minuciosamente ponderadas em aplicações práticas.

Esta análise, conduzida com uma abordagem rigorosa, destaca a importância de considerar os aspectos teóricos subjacentes ao fenômeno em estudo. As bobinas de Rogowski, apesar de sua aparente simplicidade, demonstraram comportamentos complexos quando estiveram em níveis variados de corrente elétrica.

O monitoramento de corrente desempenha um papel crucial em uma ampla gama de contextos, incluindo sistemas de distribuição elétrica, ambientes industriais e pesquisas científicas avançadas. A precisão e eficácia desses monitoramentos são diretamente influenciadas pelo *design* da bobina de Rogowski e suas características específicas.

Em cenários industriais que frequentemente envolvem correntes de alta magnitude, uma abordagem prudente consiste em adotar bobinas de menor sensibilidade, como aquelas com 800 voltas. A preferência por essa opção se justifica pelo intuito de evitar a saturação do sistema e otimizar a faixa de operação. Isso garante que as pressões atendidas nos limites aceitáveis, mesmo nas condições mais exigentes. Essa abordagem se alinha com a busca por estabilidade operacional e confiabilidade em ambientes industriais, onde a precisão dos controles pode ser comprometida pela saturação da bobina em correntes altas.

Contrastando com essa perspectiva, nas esferas de pesquisa que exigem um controle preciso de correntes de menor magnitude, surge uma necessidade de maior sensibilidade nas medições. Nesse contexto, as bobinas de Rogowski com 1550 voltas demonstram seu valor intrínseco. Essas bobinas têm a capacidade de detectar e registrar variações subtis de corrente, fundamental para a obtenção de resultados precisos em experimentos científicos que dependem de analises meticulosas. A escolha de uma bobina de maior sensibilidade e essencial para capturar nuances que podem escapar a dispositivos menos sensíveis, permitindo uma investigação mais profunda e precisa.

5. CONCLUSÕES

Neste escrito, apresentou uma análise rigorosa dos resultados decorrentes de experimentos conduzidos com as bobinas de 800 e 1550 espiras, variando a corrente de entrada. O cerne deste estudo reside na exploração da relação intrínseca entre a corrente de entrada e a tensão medida, levando em consideração as flutuações no número de espiras na bobina.

Os resultados obtidos demonstram uma relação nítida entre a corrente de entrada e a magnitude da tensão registrada, tanto para a bobina de 1550 voltas quanto para aquela de 800 voltas. A observação desta relação linear nos dados experimentais reafirma a consistência das leis fundamentais do eletromagnetismo, notadamente a lei de Ampére, consolidando assim o papel das bobinas de Rogowski como instrumentos de medição de corrente elétrica.

É importante ressaltar que os experimentos foram controlados sob condições em um ambiente laboratorial, incorporando abordagens de redução de interferências externas, como a implementação de amplificadores integradores e aplicação de filtros passa-baixa. Além disso, a sensibilidade das bobinas foi avaliada para entender sua aplicação em

diferentes cenários de aplicação, enfatizando a importância da seleção da bobina conforme a faixa de corrente a ser monitorada.

O estudo revela que, em contextos industriais que favoreceram a estabilidade operacional e confiabilidade, a preferência recai sobre o emprego de bobinas de menor sensibilidade, tais como aquelas compostas por 800 voltas. Por contraste, em ambientes de pesquisa que exigem uma precisão exímia, notadamente para correntes de baixa magnitude, como bobinas mais sensíveis, como de 1550 voltas, emergem como a escolha mais pertinente.

As percepções adquiridas por meio desta investigação estabelecem uma base sólida para o refinamento de sistemas de monitoramento de corrente em aplicações variadas, desde a distribuição de energia elétrica até empreendimento científicos de vanguarda. A apreensão da conexão intrínseca entre a corrente elétrica e o campo magnetico, aliada ao entendimento prático das características das bobinas de Rogowski, fornece contribuições substanciais para o aprimoramento de sistemas de monitoramento mais precisos.

REFERÊNCIAS

[1] T. CORMEN, C. LEISERSON, R. RIVEST, C. STEIN, A. TENENBAUM, Y. LANGSAM, and M. AUGENSTEIN, “Centro de ciências tecnologicas-cct.”

[2] J. C. F. d. Almeida, “Projeto de um sensor para detecção descentralizada ˜ de consumo de energia elétrica,” 2018

[3] M. N. Sadiku, “Elementos de eletromagnetismo. terceira edição, 2004.”

[4] E. Tico, “Bobina de Rogoski,” 2016, https://prezi.com/vpi7mrlxfmlc/ bobina-de-Rogoski/

[5] B. d. S. Xavier and F. d. S. Silva, “Projeto, construção e ensaios de um protótipo de transdutor de corrente do tipo bobina de rogowski,” 2006.

Capítulo 6

Desenvolvimento de um sistema de monitoramento do consumo de energia elétrica: uma ferramenta para o uso eficiente de energia no setor residencial

Amanda Sahory Nunes Serafim
Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella
Sophia Victória Santos

Resumo: Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de monitoramento de consumo de energia elétrica residencial com foco em eficiência energética. O sistema utiliza NodeMCU ESP32 para coletar os dados de consumo de energia elétrica em tempo real e enviar esses dados para uma planilha do *Google Sheets*. A planilha é configurada com a ajuda do *Google Scripts*, o que permite a coleta de dados automatizada. Em seguida, os dados são compilados e visualizados em gráficos e tabelas no Data Studio. O sistema proposto neste trabalho pode ser utilizado como uma ferramenta eficaz para o monitoramento e controle do consumo de energia elétrica em residências, possibilitando a identificação de padrões de consumo, pontos de desperdício e oportunidades de economia de energia. Com isso, é possível tomar medidas de eficiência energética que resultem em economia de energia e redução de custos para o usuário final. A solução proposta pôde ser desenvolvida com um baixo investimento financeiro e se mostra satisfatória para medição do consumo total de uma residência ou equipamentos acima de 30W de potência.

Palavras-chave: eficiência energética, consumo de energia elétrica, NODMCU ESP32, *google scripts.*

1. INTRODUÇÃO

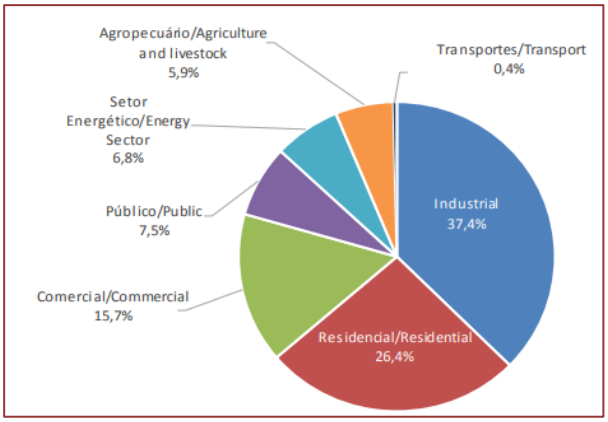
A eficiência Energética pode ser definida como a relação entre a quantidade de energia utilizada para executar determinada tarefa ou processo e a quantidade de energia necessária para executar a mesma tarefa ou processo de forma mais eficiente [1]. Em outras palavras, a eficiência energética se relaciona diretamente com a redução do consumo de energia para um mesmo processo energético, proporcionando economia de recursos e redução de impactos ambientais.

Com o crescimento exponencial da demanda energética nas últimas décadas, a importância da eficiência energética tem se tornado cada vez mais evidente. Estima-se que o setor residencial aumentará seu consumo de energia elétrica em torno de 35% até 2040, aliado à demanda mundial de energia elétrica que deve crescer em 15% em relação à demanda de 2019 [2]. Diante desse cenário, a busca por soluções que otimizem a utilização de energia elétrica tornou-se uma preocupação constante em diversos setores, tais como indústria, comércio e residências.

A adoção de medidas de eficiência energética pode ocorrer em qualquer parte do processo energético, desde a transformação da energia primaria até seu consumo de uso final. Contudo, a adoção de medidas de eficiência energética requer mais do que soluções técnicas, envolvendo também mudanças de comportamento e gestão. Vale ressaltar que, quando comparada à aquisição de novas fontes de geração, a eficiência energética pode gerar economias de até 20% [3].

No Brasil, dados do Balanço Energético Nacional – BEN [4], mostram que o setor residencial cresceu 1,09% entre 2020 e 2021 e é responsável por 26,4% do consumo total de energia elétrica no país, ficando atrás somente do setor industrial como visto na Figura 1.

Figura 1 - Participação setorial no consumo de eletricidade



Fonte: [4]

No caso de residências, o consumo de energia elétrica está diretamente relacionado às atividades realizadas pelos moradores tais como, preparo de alimentos, iluminação, climatização de ambiente e algumas atividades de lazer como assistir televisão, por exemplo. Além disso, a escolha dos equipamentos utilizados para realizar essas atividades pode ter um grande impacto no consumo final de energia. Equipamentos mais antigos, em

geral, tendem a consumir mais energia do que modelos mais recentes e eficientes. Assim sendo, a demanda é composta por diversos fatores sejam eles comportamentais, estilo de vida e hábitos socioculturais. [5]

As práticas individuais são essenciais para reduzir os comportamentos de desperdício. No entanto, essas mudanças dificilmente são induzidas por medidas políticas, exceto por incentivos à adoção de tecnologias eficientes e tarifas por tempo de uso, que se mostram moderadamente bem-sucedidas [6]. O monitoramento do consumo, forneceria nesse caso, aos usuários, informações para melhorar o desempenho de suas residências e identificar oportunidades de redução de custos, detectando ineficiências, comparando e planejando a carga e o uso de energia [5]. Um exemplo desse monitoramento, demostrou que o é o Brasil possuía um alto consumo provocado pelo uso de chuveiros elétricos, o que poderia ser melhorado utilizando o sistema de aquecimento solar [7].

Porém para que sejam detectadas tais oportunidades é preciso que essa medição ocorra continuamente e os dados sejam de fácil acesso, além de que o equipamento de medição ser acessível financeiramente e de fácil instalação, de forma a viabilizar seu uso por consumidores desse perfil. Para maximizar a eficiência é necessário ainda que esse sistema de monitoramento tenha baixo consumo, questões as quais os sistemas tradicionais dão menos atenção. [8]

Por todo exposto, o presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver e implementar um sistema de monitoramento de consumo de energia elétrica residencial, utilizando sensor de corrente, microcontrolador e tecnologias de comunicação sem fio. Serão abordados conceitos teóricos relacionados à medição de consumo elétrico, bem como detalhes sobre a escolha dos componentes e tecnologias utilizadas na construção do sistema. Ao final, espera-se e pretende-se fornecer uma contribuição para a disseminação do conhecimento e aplicação prática de sistemas de monitoramento de consumo de energia elétrica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Essa seção tem como objetivo mostrar as etapas do dispositivo de monitoramento desenvolvido, incluindo a arquitetura adotada, os componentes que integram o *hardware* escolhido, o gerenciador (*software*) do sistema, todas as tecnologias utilizadas no desenvolvimento incluindo os conceitos e definições de terminologias relevantes para o desenvolvimento do Projeto.

2.1. *DESIGN* DO SISTEMA

O monitoramento remoto é uma das principais aplicações da Internet das Coisas, ou IoT[1], e trata-se da interconexão de dispositivos físicos, que são capazes de se comunicar e trocar informações entre si, sem a necessidade de intervenção humana direta. Esses dispositivos são equipados com sensores e sistemas embarcados, que permitem coletar e transmitir dados em tempo real, o que permite monitorar, controlar e otimizar processos de maneira eficiente [9].

Um exemplo de monitoramento remoto usando IoT é o monitoramento de consumo de energia elétrica em residências. Sensores podem ser instalados nos pontos de consumo e

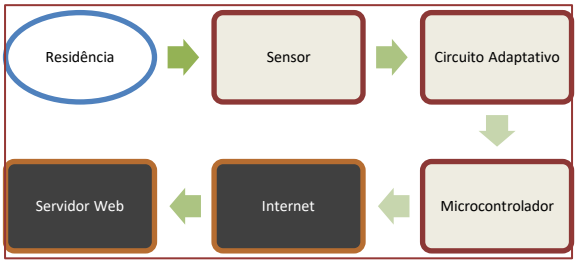
[1] Do inglês, *Internet of Things*

conectados a uma plataforma de IoT, essas informações são analisadas e exibidas em gráficos e tabelas para que o usuário possa visualizar o consumo total, o horário de maior consumo além dos padrões de consumo ao longo do tempo [10], permitindo identificar picos de consumo e oportunidades de economia [11].

Para monitorar o consumo de energia elétrica da residência em análise deste trabalho, utilizou-se um protótipo que possui um sensor que captura os dados e os envia para um servidor atualizado automaticamente e periodicamente. O sistema de monitoramento ocorre em tempo real e é armazenado em "nuvem". As informações armazenadas são disponibilizadas para visualização remota ou local via plataforma *web*.

Assim sendo, o sistema é constituído primordialmente por duas partes: *hardware* e *software* que estão representados na Figura 2 nas cores cinza claro e cinza escuro, respectivamente. O *hardware* é composto por um sensor, um circuito adaptativo e um microcontrolador com placa de rede, configurando um dispositivo de computação embarcada; já o *software* é formado por um sistema de coleta, armazenamento e visualização dos dados.

Figura 2 – Diagrama de blocos dos componentes do sistema



Fonte: Autoria Própria, 2023.

As especificações de cada componente são importantes para garantir o funcionamento de acordo com o esperado, e desse modo, a Tabela 1 mostra a descrição dos principais componentes do sistema e o valor monetário dos itens adquiridos. O motivo de escolha e o funcionamento desses componentes pode ser visto na seção *B* (*Aquisição dos dados*) deste trabalho.

Tabela 1 – Lista de materiais usados no hardware do protótipo

Componente	Preço[2]
NodeMcu ESP-12E ESP8256	R$30,17
Sensor AC SCT 013-000	R$27,54
Outros componentes	R$7,70
Total	**R$ 65,41**

Fonte: Autoria Própria, 2022.

[2] Orçamento realizado no dia 27 de setembro de 2022 em sites de compras *online*.

Durante a pesquisa dos componentes também se pesquisou outras soluções para monitoramento validadas no mercado para fins residenciais, tais aparelhos custavam entre R$ 470,00 e R$1059,00 em pesquisa realizada ente junho de 2022 e janeiro de 2023.

2.2. AQUISIÇÃO DOS DADOS

A aquisição de dados físicos por sinais elétricos refere-se à captura de informações úteis a partir de sinais eletromagnéticos, que, por sua vez, são medidos e convertidos no formato digital para processamento. Os valores adquiridos pelos sensores são tratados e convertidos para grandezas que sejam do entendimento do microcontrolador. Como algumas leituras não são adequadas para entrada de um conversor Analógico/Digital (AD) pode-se ainda usar um circuito adaptativo, que tem a finalidade de alterar o sinal. Tais circuitos podem incluir amplificação, atenuação, filtragem e isolação.

No monitoramento de consumo de energia elétrica, tem a potência como a grandeza de maior interesse, pois ela permite a mensuração da quantidade de energia consumida por um equipamento em um determinado período. O monitoramento do consumo de energia elétrica, utiliza a potência ativa consumida, conforme observado na Equação 1, sendo o consumo de energia [C], em kWh; a potência [P], em *watt*; e o tempo[t], em horas.

$$C = \frac{P}{1000} * t \qquad (1)$$

A medição de potência é feita por meio de dispositivos de monitoramento de energia, que podem ser instalados em circuitos elétricos específicos ou em aparelhos individuais. Esses dispositivos geralmente utilizam sensores de corrente e tensão para calcular a potência elétrica e o consumo de energia [12].

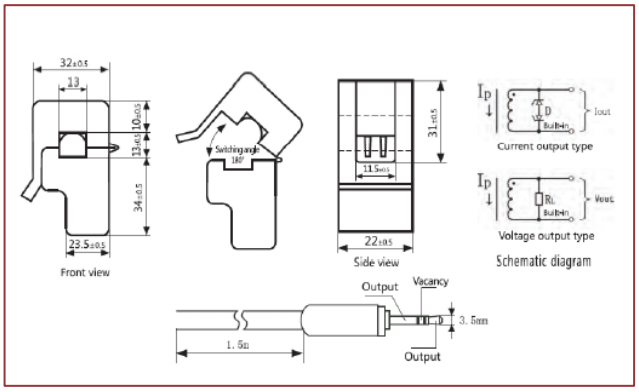
2.2.1. SENSOR DE CORRENTE

Um medidor de corrente não invasivo é um dispositivo que mede a corrente elétrica sem entrar em contato direto com os condutores, também podem ser chamados de Transformadores de Corrente (TC). Estes são usados para medições de segurança e precisão, especialmente em aplicações críticas. Eles também podem detectar mudanças na corrente elétrica sem o risco de danos físicos ou choques elétricos. Seu princípio de funcionamento é baseado na relação de transformação usada em transformadores, que trata a respeito da tensão nas bobinas de um transformador, sendo diretamente proporcional ao número de espiras das bobinas.

Para a aquisição dos valores de corrente será usado um modelo de sensor não invasivo, SCT[3]-013-000 (*vide* Figura 3), seu funcionamento é análogo ao de um alicate amperímetro. Sua especificação técnica é de 100A no primário e de 50mA de saída no secundário. Sua faixa de operação é não linear em 3% e tem uma taxa de variação de seu valor nominal que vai de 10% a 120%, equivalente a 10A e chegando até 120A, considerada a melhor faixa para funcionamento.

[3] SCT vem do inglês e significa "*Split-core Current Transformer*". Em tradução literal chama-se "Transformador de Corrente de Núcleo Dividido".

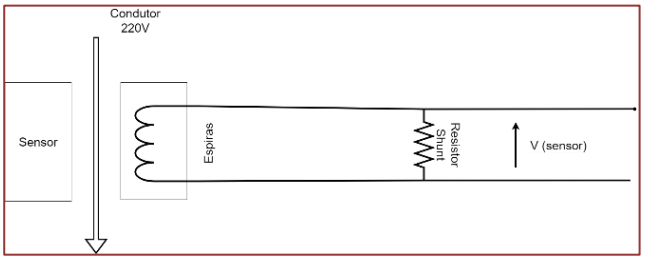
Figura 3 – Esquema do sensor de corrente



Fonte: [13].

Como sua saída está relacionada a corrente, foi preciso efetuar a conversão destes valores para tensão. A corrente que circula pelo condutor do dispositivo que se deseja medir, atua no enrolamento primário e internamente há um enrolamento secundário, e em sua saída é adicionado um resistor em paralelo chamado de *shunt* (*vide* Figura 4), que tem como função principal criar uma diferença de potencial no circuito.

Figura 4 - Saída do sensor de corrente



Fonte: Autoria Própria, 2023.

O valor da resistência é dado pela queda de tensão no limite máximo de corrente, conforme o *datasheet* e utilizando a relação de transformação (Equação 2) em que N2, I1 e I2 representam o número de espiras do primário e as correntes que circulam no primário e no secundário do TC respectivamente, é possível encontrar o número de espiras do secundário [N2].

$$\frac{N1}{N2} = \frac{I2}{I1} \rightarrow N2 = \frac{N1 * I1}{I2} \rightarrow N2 = \frac{1 * 100A}{50mA} = 2000\ espiras \quad (2)$$

A corrente de saída do sensor é inversamente proporcional ao número de espiras. Logo, ao dividir-se o valor de corrente de pico medido pelo sensor [Im] é possível encontrar a corrente máxima de saída do sensor [Is], conforme a Equação 3.

$$Is = \frac{Im}{N2} = \frac{100 * \sqrt{2}}{2000} = 0{,}0707A \qquad (3)$$

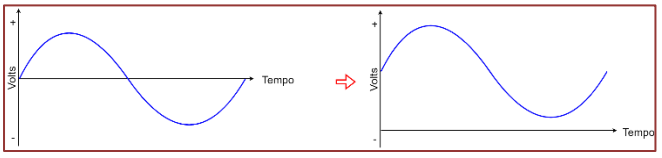
Para efetuar a leitura adequadamente da tensão através do resistor *shunt*, o pico de corrente deve ser igual a metade da tensão de entrada [V] que para os NodeMCu ESP8256 é de 3,3V. Nesse caso o resistor *shunt* [Rs] calculado conforme a Equação 4.

$$Rs = \frac{V/2}{Is} = \frac{3{,}3V/2}{0{,}0707A} = 23{,}22\Omega \qquad (4)$$

Como o valor calculado para o resistor não é um valor comercial, utilizou-se um resistor de 22 Ω. Logo, optou-se por um resistor menor para que a tensão não fosse superior ao limite do conversor AD.

Tendo em vista que valores negativos não são lidos pelo microcontrolador e o sinal lido alterna entre positivo e negativo, o conversor AD não efetua corretamente as leituras nestes sinais. Sendo assim, optou-se pela elaboração de um circuito divisor de tensão com um capacitor na saída. Esse circuito funcionará como uma bateria de 1,7V adicionando essa tensão à fonte AC. Deslocando a forma de onda assim como na Figura 5, este valor de tensão acrescentado a forma de onda é chamado de *offset*.

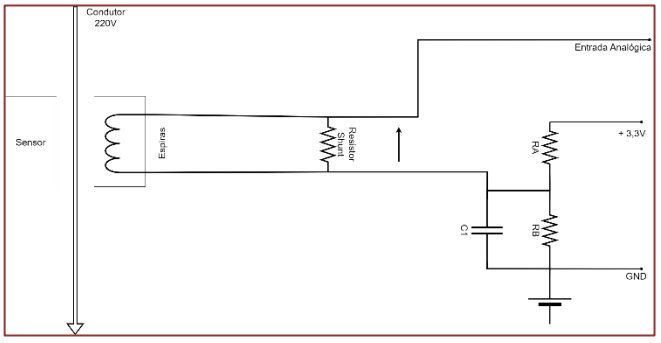
Figura 5 - Forma de onda da tensão no resistor de carga (a esquerda) e a mesma forma com o offset (a direita)



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Finalizando essa etapa, o circuito final pode ser visto na Figura 6, e os resistores escolhidos foram de 10KΩ, para manter o consumo de energia baixo. O valor de 10µF foi escolhido por possuir uma baixa reatância, fornecendo um caminho alternativo para a corrente.

Figura 6 - Circuito final



Fonte: Autoria Própria, 2023.

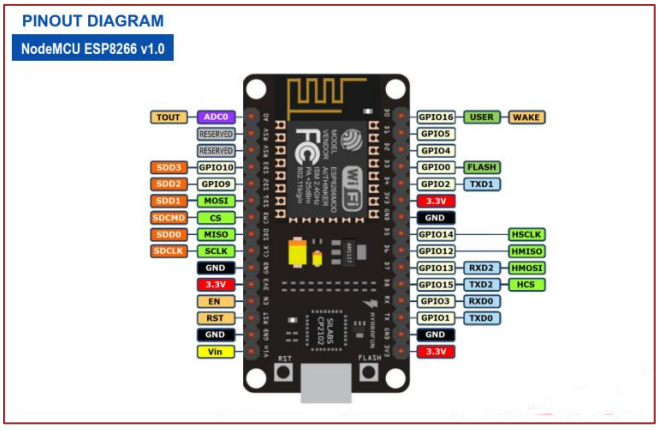
2.2.2. MICROCONTROLADOR

Os microcontroladores são dispositivos eletrônicos programáveis que contêm um ou mais processadores, memória interna, conectividade de entrada/saída e diversos periféricos. Eles são usados para controlar processos industriais, automação, equipamentos domésticos, telecomunicações e outros.

Neste trabalho foi utilizado o microcontrolador NodeMCU ESP32, desenvolvido pela empresa Einstronic. O NodeMCU ESP32 é um sistema de computação embarcado *open source* que fornece conectividade *Wi-Fi* e *Bluetooth Low Energy* (BLE). Permite também o desenvolvimento fácil de projetos *on-line* e *off-line*, com base em programação Lua ou com suporte ao Arduino@ IDE. Ele possui recursos embutidos, incluindo uma variedade de sensores internos, além de suportar GPIOs (tipo de pino digital programável) adicionais. Por suas características, o NodeMCU ESP32 é considerado ideal para projetos IoT e outras aplicações onde o tamanho e a autonomia são essenciais.

O microcontrolador NodeMCU ESP32 contém 30 pinos de entrada ou saída de uso geral, descritos na Figura 7. Além disso, utiliza o Protocolo de Controle de Transmissão, do inglês *Transmission Control Protocol* (TCP) e o Protocolo de Internet, do inglês *Internet Protocol* (IP), formando o protocolo TCP/IP e o *WiFi MAC* 802.11 b/g/n, que transmite sinais sem fio através de ondas eletromagnéticas.

Figura 7 - Pinagem NodeMCU ESP32



Fonte: [14].

2.3. TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados coletados pela porta AD do microcontrolador passam por um processamento prévio antes de serem transmitidos ao servidor. Esse processamento inclui o tratamento dos dados para garantir sua precisão e a realização de cálculos relevantes, como os relacionados à corrente e potência, bem como variáveis de ajuste e outras informações pertinentes. Todos esses cálculos são executados por meio do código gravado no microcontrolador, que é responsável por processar os dados brutos da porta AD. Dessa forma, quando os dados são enviados ao servidor, eles já estão prontos para serem exibidos para o usuário final, sem a necessidade de qualquer tratamento adicional.

As leituras da corrente são coletadas pelo sensor de corrente e convertidas em um sinal elétrico proporcional. Esse sinal é então processado pelo circuito adaptativo para garantir

a precisão da leitura. Em seguida, o sinal é enviado para a porta conversora AD do microcontrolador, onde é digitalizado. O microcontrolador realiza cálculos com base no valor digitalizado e envia o resultado para o destino desejado.

Durante todo o processo de programação do dispositivo, foi utilizado o Arduino IDE, uma aplicação multiplataforma, que inclui um editor de código, sendo capaz de compilar e carregar programas para a placa. Para os cálculos foi utilizado a biblioteca *Emonlib*[4], que está diretamente relacionada com o consumo de energia elétrica.

A calibração da leitura é ajustada via *software*. Na teoria, essa constante de calibração pode ser encontrada dividindo o número de espiras [N2] pelo resistor *shunt* [Rs], conforme a Equação 5.

$$Valor\ de\ Calibração = \frac{2000}{22} = 90{,}9 \qquad (5)$$

Como a Equação 5 desconsidera fatores como tipo do condutor e o comprimento do condutor entre o sensor e o microcontrolador, os valores referentes à variável de calibração foram arbitrados conforme testes realizados no local com o auxílio de um amperímetro devidamente aferido de forma que as leituras se mantivessem de acordo com as medições no ponto de aplicação.

No código fonte do Projeto, Apêndice A, há uma linha com valor 1480 dentro da função emon1.calcIr*ms*. Este valor indica a quantidade de amostras utilizadas no código. Para que a medição tenha boa exatidão é necessário que o número de pontos seja o equivalente de amostras dentro de N ciclos completos da rede. Sabendo que um ciclo da rede de 60 Hz tem duração de 16,67ms foi possível calcular que são necessárias 99,84 amostras por ciclo. Sendo assim, quanto maior a quantidade de ciclos completos forem amostrados, mais estáveis serão as medições. Neste caso, foi definido que 20 ciclos completos, ou seja, aproximadamente 1997 amostras seriam suficientes.

O ESP32 possui 2 microprocessadores. O código tem duas partes distintas, sendo estas por tarefas. A tarefa que roda no Core 0, é a atividade de envio para o *Google Sheets* e leva cerca de 4 segundos. Já a atividade do Core 1, é a medição da corrente.

2.4. ENVIO DOS DADOS

O *Google Scripts* é uma plataforma de computação em nuvem que permite a execução de *scripts* baseados em *JavaScript* para automatizar tarefas e adicionar recursos personalizados ao *Google Apps*. O serviço HTML do *Google Scripts* oferece suporte aos usuários no que diz respeito à criação de páginas *Web* dinâmicas, integração de APIs externas e gerenciamento de dados. Os *scripts* são executados em um ambiente virtual seguro, permitindo que os usuários desenvolvam soluções avançadas sem ter que lidar com questões relacionadas à segurança. A plataforma do *Google Scripts* também fornece ferramentas para criação de gráficos e interações entre usuários e dispositivos.

Sendo assim, para o envio dos dados foi usada a plataforma do *Google Scrips*, para criar um app da *Web* com o serviço HTML que juntamente ao *Google Sheets*, ferramenta gratuita para criação de planilhas que funciona integrada ao *drive* do Google, armazena os dados a serem obtidos. O *Google Sheets* funciona totalmente *online*, portanto, pode ser usado como banco de dados em "nuvem". Sendo necessário somente ter uma conta Google / Gmail.

[4] Uma biblioteca de código aberto, podendo, portanto, ser usada e modificar os critérios do Projeto.

Para a implementação do código utilizou-se a função doGet() que informa ao script como exibir a página. A interface do sistema e o uso da função podem ser vistos na Figura 8. A função precisa retornar um objeto HtmlOutput, e a cada vez que rodar a URL, será inserida uma nova linha na planilha usada como banco de dados.

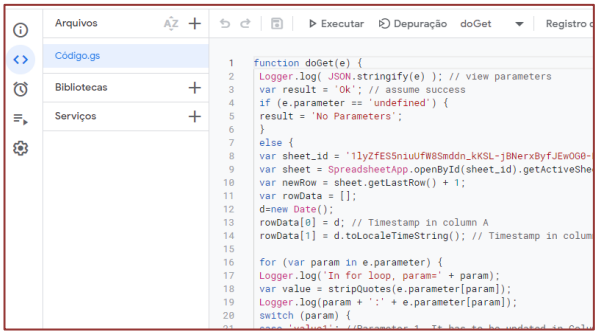
Na programação do NodeMCU foram usadas as bibliotecas *Wifi* e HTTPClient. A conexão *WiFi* permite que o NodeMCU ESP32 se conecte a uma rede local e faça o envio de dados para *web*. Já o O HTTP *Client* fornece uma maneira fácil de realizar *uploud* em banco de dados. Esta abordagem é ideal para projetos IoT, pois permite que o dispositivo receba informações de qualquer lugar do mundo.

2.5. VISUALIZAÇÃO DOS DADOS

A quantidade de dados gerados a partir do monitoramento pode tornar difícil analisar e obter informações. “Big data” se refere a um conjunto de dados dinâmicos gerados por sistemas complexos que possuem três características principais: volume, velocidade e variedade. O objetivo da pesquisa em big data é extrair informações úteis a partir de grandes conjuntos de dados e aplicá-las para melhorar a tomada de decisões em diversos campos, como negócios, saúde, ciência e tecnologia [15]

O principal objetivo da visualização de dados desse Projeto é informar de maneira clara e objetiva ao consumidor (usuário), utilizando meios gráficos e numéricos, o consumo mensal de energia elétrica da sua residência para serem monitorados. Para isso, será usada o *Google Data Studio*, ferramenta *on-line* de visualização de dados que permite a criação de relatórios e painéis personalizados. É baseado em recursos intuitivos, como gráficos interativos e filtros, e permite a análise profunda dos dados a partir de banco de dados ou planilhas.

Figura 8 - Interface do Google Scrips com parte do código usado na implementação do Script

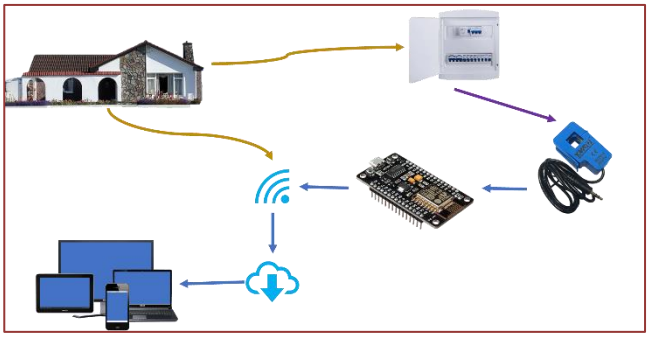


Fonte: Autoria Própria, 2023.

2.6. *OVERVIEW* DO SISTEMA

A Figura 9 apresenta o esquema utilizado para a coleta dos dados de consumo de energia elétrica, no caso, o *design* do sistema. O sensor de medição de energia foi instalado no quadro de distribuição da residência, próximo ao disjuntor geral, a fim de capturar os dados de consumo em tempo real. O período de coleta de dados foi de três dias.

Figura 9 -*Design* do Sistema

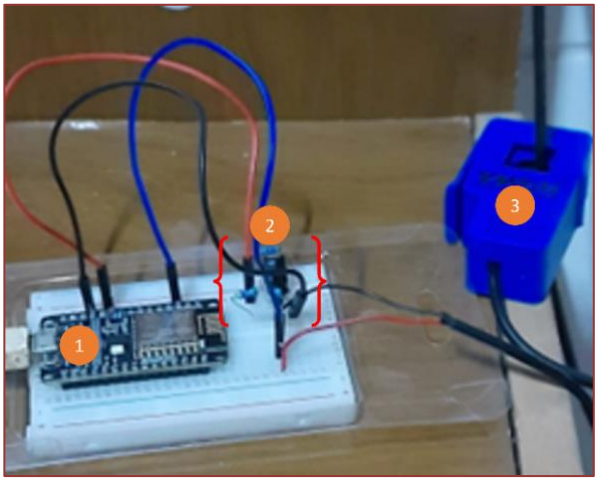


Fonte: Autoria Própria, 2023.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nos testes iniciais, para verificar se os resultados obtidos no Projeto proposto estavam em conformidade, foram realizadas medições com um ferro de passar elétrico e um ventilador, equipamentos de uso residencial, com o objetivo de realizar as comparações dos valores encontrados neste trabalho com valores obtidos por meio do equipamento de medição e das especificações desses equipamentos. Os resultados se mostraram satisfatórios e com erro inferior a 1%, o protótipo usado nos testes pode ser visto na Figura 10, em que (1) é o microcontrolador NodeMCU ESP32, (2) é o circuito adaptativo já mostrado na Figura 6 e (3) o Sensor de corrente.

Figura 10 - Protótipo desenvolvido



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Devido aos ruídos digitais gerados pelo NodeMCU ESP32 ou algum ruído externo captado pela Protoboard ou até mesmo pela fiação e talvez pelo próprio conversor AD, é possível captar leituras quando não há corrente fluindo no sistema. Isso ocorre, pois, para calcular a corrente RMS cada amostra atual do sensor é multiplicada por si mesma. A média é calculada e a corrente RMS é a raiz quadrada desse número. O mesmo ocorre se a corrente for o menor imaginável, logo, para qualquer carga de potência até 30 W, a medição se torna imprecisa.

Ressalta-se que nas piores condições possíveis e antes da calibração, uma medição de corrente pode estar em erro em quase 10%, conforme os dados da Figura 12.

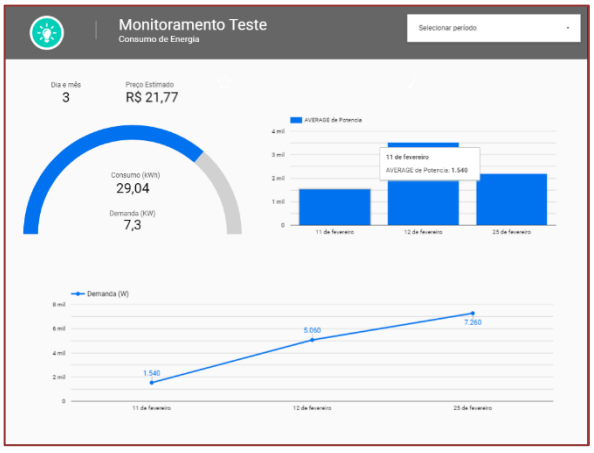
Tabela 2 - Fontes de erro na medição

Local	Erro
Sensor de Corrente	± 3%
Resistor *shunt*	± 0,75%
Adaptador CA	± 3%
Divisor de tensão	± 1,8%
Referência analógica	± 1,1%
Total	**±9,65**

Fonte: Autoria Própria, 2023

A visualização dos dados coletados é uma das principais partes deste Projeto, pois tem a capacidade de deixar o usuário informado a respeito do consumo de energia elétrica diário da residência. O *layout* inicial usando a Data Studio, pode ser visto na Figura **11**. Nessa página podem ser aplicados filtros, a fim de se ver os períodos de maior consumo de energia elétrica do local analisado. Também foram adicionados os dias de consumo, a estimativa do valor monetário a ser pago e uma página para visualização dos dados diários.

Figura 11 - Página de visualização dos dados



Fonte: Autoria Própria, 2023.

Ao analisar a

Figura **11**, é possível observar que o décimo segundo dia do mês analisado apresentou o maior consumo de energia elétrica dentre os três dias monitorados. Durante esse período, o consumo projetado totalizou R$21,77. O gráfico de crescimento acumulado permite ao consumidor visualizar o consumo ao longo do tempo, enquanto o gráfico de barras facilita a identificação dos dias com maior ou menor consumo.

Durante o período de medição, o consumo da residência foi mantido acima de 30W durante todo o tempo, demonstrando uma estabilidade na leitura das informações, sem apresentar erros superiores a 1%. A partir da análise dos dados coletados, foi possível constatar que o Projeto proposto funcionou corretamente, realizando a leitura precisa das informações de corrente, o cálculo da potência e o envio dessas informações para a "nuvem".

4. CONCLUSÃO

Durante o desenvolvimento de todas as etapas do Projeto houve a preocupação em transmitir de forma didática, simples e direta a construção de um sistema que possibilite o monitoramento em tempo real do consumo de energia elétrica ao usuário. Esse dispositivo pôde ser desenvolvido com baixo investimento financeiro e possuir a mesma finalidade de outros sistemas semelhantes que são comercializados por preços bem mais elevados, conforme também já mostrado neste trabalho, que variaram entre R$ 470,00 e R$1059,00, enquanto o Projeto aqui desenvolvido teve um custo inferior a R$ 70,00[5].

Os resultados do monitoramento do consumo de energia elétrica da residência, mostraram que o protótipo realizou as medições de corrente e calculou a potência. Os valores de potência calculados foram armazenados em uma planilha na "nuvem" juntamente com a data e a hora em que foi realizada a leitura. Os dados armazenados foram tratados e disponibilizados em um painel, com isso se mostrou o gráfico de consumo por dia; o consumo total e o valor monetário em reais. Desta forma, foi possível monitorar o consumo de energia elétrica da residência, possibilitando uma supervisão para se alcançar um controle dos gastos. Logo, o projeto informa o usuário sobre o consumo de energia elétrica consumida pela residência, podendo, claro, expandir para medição individual dos equipamentos e ou circuitos de acordo com as cargas.

Por outro lado, o sistema desenvolvido resolve somente parte do problema visto que mudanças no comportamento e hábitos também devem ser estimulados com educação e aconselhamento; paralelamente técnicas de monitoramento e controle também compensariam os comportamentos inconscientes dos ocupantes por meio de controles de agendamento, otimização do sistema e controle de detecção de ocupantes.

REFERÊNCIAS

[1] SOUSA, D. F. D. et al. Efficiency, quality, and environmental impacts: A comparative study of residential artificial lighting. **Energy Reports**, v. 5, p. 409-424, 1 Novembro 2019. Disponivel em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484718303652?via%3Dihub>.

[2] EXXON MOBIL. **2022 Outlook for Energy**. ExxonMobil: Irving. Texas. 2021.

[3] COSTA, J. D. S.; ANDRADE JUNIOR, L. M. D. Eficiência energética aplicada ao consumo de energia elétrica: um estudo de revisão bibliográfica. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, p. e26210414085, Abril 2021. ISSN ISSN 2525-3409. Disponivel em:

[5] Não foi considerado o custo com armazenamento na nuvem.

https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/14085/12664>.

[4] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Balanço Energético Nacional 2022**: **Ano base 2021**. EPE. Rio de Janeiro. 2022.

[5] GONZÁLEZ-TORRES, et al. A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. **Energy Reports**, v. 8, p. 626–637, Novembro 2022.

[6] ALTOÉ, L. et al. Políticas públicas de incentivo à eficiência energética. **Estudos Avançados**, v. 31, n. 89, p. 285–297, Abril 2017.

[7] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. EPE. Ministério de Minas e Energia. 2022.

[8] WANG, Y. et al. **An energy-aware power monitor system aiming at energy-saving**. In Green and Sustainable Computing Conference (IGSC). Eighth International: IEE. 2017. p. 1-8.

[9] KHAN, J. Y.; YUCE, M. R. **Internet of Things (Iot):** Systems and Applications. 1°. ed. New York: Jenny Stanford Publishing, 2019.

[10] LIMA, M.; ALVES, ; JUCA, S. **Sistema IoT para Monitoramento de Temperatura e Umidade Ambientes e Acionamento Remoto de Cargas**. Anais da IV Escola Regional de Informática do Piauí. Porto Alegre: ERI-PI. 2018. p. 232 - 237.

[11] EUCHNER,. The Internet of Things. **Research-Technology Management**, 3 Setembro 2018. p. 10 - 11.

[12] SILVA, M. C. I. **Correção Do Fator De Potência De Cargas Industriais Com Dinâmica Rápida**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Eletrônica de Potência, 2009. Minas Gerais. 2009.

[13] YHDC. **Split core current transformer**. Model: SCT-013. Warszawa.

[14] EISTRONIC. **Introduction to NodeMCU ESP8266**. DEVKIT v1.0. Sabá. 2017.

[15] CHEN, Y. et al. Big data analytics and big data science: a survey. **Journal of Management Analytics**, v. 3, n. 1, p. 1–42, Janeiro 2016.

APÊNDICE A – CÓDIGO MICROCONTROLADOR

```
#include <HTTPClient.h>
#include <WiFi.h>
#include "string.h"
#include "EmonLib.h"
EnergyMonitor emon1;

const char* ssid     = "*********";
const char* password = "*****";

char *server = "script.google.com";

char *GScriptId = "******************************";

const int httpsPort = 443;

TaskHandle_t Task1;
TaskHandle_t Task2;

WiFiClientSecure client;

void setup() {
  Serial.begin(9600);



connect_wifi();


  xTaskCreatePinnedToCore(
                Task1code,
                "Task1",
                10000,
                NULL,
                1,
                &Task1,
                1);

[  xTaskCreatePinnedToCore(
                Task2code,
                "Task2",
                10000,
                NULL,
                1,
                &Task2,
                0);

}

void loop() {
disableCore0WDT();
}

void Task1code( void * pvParameters ) {

emon1.current(1, 111.1);
for (;;) {

double Irms = emon1.calcIrms(1480);
double potencia = Irms *220;

}
}

void Task2code( void * pvParameters ){
```

```
  for(;;){

   enviarMedicao();

   }
}

void connect_wifi(void)
{

 Serial.print("Connecting to wifi: ");
 Serial.println(ssid);
 Serial.flush();
 WiFi.begin(ssid, password);
 while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
 {

  delay(500);
  Serial.print(WiFi.status());
  Serial.print(".");
 }

 Serial.println("");
 Serial.println("WiFi connected");
 Serial.println("IP address: ");
 Serial.println(WiFi.localIP());
}

void enviarMedicao()
{
 HTTPClient http;

 tempoEnvio = millis() - tempoEnvio;
 String url = String("https://script.google.com") + "/macros/s/"
+ GScriptId + "/exec?" + "value1=" + Irms + "&value2=" +
potencia + "&value3=" + tempoEnvio;
 tempoEnvio = millis();

 Serial.print("Making a request");
 http.begin(url.c_str()); //Specify the URL and certificate

http.setFollowRedirects(HTTPC_STRICT_FOLLOW_REDIRECTS);
 int httpCode = http.GET();
 String payload;
 if (httpCode > 0) { //Check for the returning code
  payload = http.getString();

  Serial.println(httpCode);
  Serial.println(payload);
  //    testdrawstyles(payload);
  //if (httpCode == 200 or httpCode == 201)
tempPing.Saida(0);
 }
 else {
  Serial.println("Error on HTTP request");
 }
 http.end();

}
```

Capítulo 7

Materiais para produção de células solares: revisão integrativa

Magno de Lima Silva
Kessi Jhony de Araújo Silva
Beatriz da Silva Carvalho
Geremias de Sousa Rodrigues
Marcos Coelho Rodrigues
Mateus de Sousa Rodrigues
Maria Lúcia da Silva Rodrigues

Resumo: A pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias para energias renováveis têm crescido substancialmente e entre as principais fontes desse tipo de energia destaca-se a energia obtida a partir da luz solar. A principal forma de produzir energia elétrica a partir da captação da energia solar é através de um sistema de produção fotovoltaica que, através da utilização de células fotovoltaicas, converte diretamente a energia luminosa em eletricidade. De forma paralela, o aumento da demanda implica no surgimento de novos materiais, métodos de fabricação e dispositivos com maiores eficiências. Nesse contexto, diferentes tipos de células solares, preparadas com diversos materiais e em diferentes configurações, vêm se tornando destaque na pesquisa atualmente. Esse estudo teve como objetivo apresentar os diferentes tipos de materiais empregados no desenvolvimento de células solares para painéis fotovoltaicos. Trata-se de uma revisão integrativa da literatura. Para a seleção dos estudos foi realizada a busca de publicações indexadas nas bases de dados, onde elegeu-se 36 artigos para leitura prévia, dentre os quais foram selecionados 10 artigos que cumpriram os critérios de inclusão e exclusão definidos. Várias classes de células solares que convertem a luz solar em energia elétrica estão disponíveis, contudo, a eficácia desses dispositivos dependerá do tipo de material a ser utilizado na sua fabricação. O silício cristalino ainda é o predominante, mas a tecnologia de filmes finos emergentes em que estão as células solares sensibilizadas por corantes naturais vem ganhando espaço, pela alta eficiência, baixo custo, dentre outros fatores.

Palavras-chave: materiais, energia solar, células solares.

1. INTRODUÇÃO

A energia solar se apresenta como uma das fontes alternativas de energia mais promissoras (AMÂNCIO *et al*., 2021). De acordo com Bursztyn (2020), as tecnologias para aproveitamento da energia solar por meio de painéis fotovoltaicos tiveram grande avanço nas últimas décadas. Comparativamente a outras opções de produção de energia elétrica, a fotovoltaica foi a que teve o melhor desempenho ao longo dos últimos anos.

No contexto das fontes renováveis de energia, o Brasil é um país privilegiado pois conta com um extenso território com alta disponibilidade e uniformidade de radiação solar para aproveitar a energia gerada pelo sol, que pode ser explorada de forma significativa (BENDER *et al*., 2020).

O conjunto de células fotovoltaicas formam um painel fotovoltaico. A geração de energia solar fotovoltaica está relacionada diretamente com o nível de irradiância incidente no painel fotovoltaico (LOPES; FRANCO; VIEIRA, 2020).

No sistema fotovoltaico as células solares convertem a luz solar em energia elétrica, de forma silenciosa e sustentável, tendo um impacto mínimo (BENDER *et al*., 2020). Atualmente, as células solares são classificadas em três tipos: células solares de primeira, segunda e terceira gerações, as quais são diferenciadas basicamente pelos materiais e tecnologias de processamento utilizados em sua fabricação (RAPHAEL *et al*., 2018).

Segundo Costa, Hirashima e Ferreira (2021), a tecnologia fotovoltaica, é dominada atualmente pelo uso de células de silício cristalino (primeira geração) e destaca-se pela possibilidade de geração distribuída, na qual o consumidor pode gerar energia para seu próprio consumo e, também, injetá-la na rede elétrica. Entretanto, as células solares de silício monocristalino e policristalino, também conhecidas como células de Wafer, ainda têm um custo de produção relativamente alto (AMÂNCIO *et al*., 2021).

Assim, com a descoberta de novos materiais e tecnologias com baixo impacto ambiental e de fontes nacionais, surgiram: a segunda geração de células solares conhecida como filmes finos inorgânicos, construídas à base de silício amorfo, CIGS (seleneto de cobre, índio, gálio), CdTe (telureto de cádmio) ou CZTS (sulfeto de cobre, zinco, estanho) e; a terceira geração que perfaz as células solares baseadas em polímeros conjugados (orgânicas), perovskitas, sensibilizadas por corante, pontos quânticos e híbridas orgânico-inorgânico, como uma forma de baratear os custos (RAPHAEL *et al*., 2018; ROSA; TOLEDO, 2021).

A produção de energia por meio de células solares é uma alternativa para levar energia a diversas regiões do país, e, assim, estudos vêm sendo realizados e tecnologias têm sido amplamente testadas para produzir dispositivos fotovoltaicos que são aplicados na conversão da luz solar em eletricidade com mais eficiência (VITORET *et al*., 2017).

À vista do exposto, esse estudo teve como objetivo destacar os diferentes materiais utilizados no desenvolvimento de células solares para painéis fotovoltaicos.

2. METODOLOGIA

O presente estudo trata-se de uma revisão integrativa da literatura com abordagem qualitativa e caráter exploratório. Esse tipo de estudo viabiliza a análise de pesquisas científicas de modo sistemático e amplo, favorecendo a caracterização e divulgação do conhecimento produzido (RAMALHO *et al*., 2016).

O procedimento para se alcançar o objetivo supracitado foi conduzido em seis etapas, conforme descrito por Souza, Silva e Carvalho (2010) as quais compreendem: (1) elaboração da pergunta norteadora; (2) busca ou amostragem na literatura; (3) coleta de dados; (4) análise crítica dos estudos incluídos; (5) discussão dos resultados; e (6) apresentação da revisão integrativa.

Dessa forma, a pesquisa visou responder ao seguinte questionamento: quais as principais matérias-primas empregadas na confecção de células solares?

Entre os meses de agosto e setembro de 2021 ocorreu a seleção dos artigos onde adotou-se como critérios de inclusão: (1) artigos originais disponíveis na íntegra, publicados nos idiomas português e inglês; e (2) com a data de sua publicação no período de 2016 a 2021, no sentido de esses apresentarem resultados mais atualizados acerca da temática. Os critérios de exclusão dos artigos foram textos duplicados nas bases de dados, incompletos e estudos inconclusivos ou que identificassem descontextualização ou sem aderência ao tema.

Para o levantamento e seleção dos artigos, utilizou-se como estratégia uma busca de publicações indexadas nas seguintes bases de dados: Scientific Eletronic Library Online (SciELO) e Portal de Periódicos CAPES utilizando os seguintes descritores nas pesquisas: energia solar e células solares.

A partir dessa amostragem, elegeu-se 36 artigos para leitura prévia com ênfase naqueles que corresponderam ao objetivo principal deste estudo, a fim de organizar e tabular os dados. Após esse processo selecionou-se 10 artigos pra elaboração da revisão integrativa, os quais foram organizados em um quadro com base nas seguintes informações: autores, ano, título da publicação, área acadêmica dos autores, revista, objetivo, além de um breve resumo sobre seu desfecho.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 1 são apresentadas as características gerais dos artigos originais selecionados para análise com base nos critérios pré-estabelecidos. Verifica-se um total de quatro artigos do ano de 2017, três de 2018 e um para os anos de 2016, 2020 e 2021.

Quadro 1: Características gerais dos estudos selecionados na revisão integrativa

	Autores /Ano da Publicação	Título da Publicação	Área Acadêmica dos Autores	Revista	Objetivo	Desfecho
1	Tractz *et al.* (2018)	Estudo de células solares híbridas de TiO_2 com corantes naturais	Química	Revista Virtual de Química	Caracterizar células solares produzidas com TiO_2 e diferentes frutos ricos em antocianinas, determinando assim, qual material é mais promissor para o desenvolvimento de sistemas solares híbridos.	A célula solar produzida com corante de ameixa apresentou os maiores valores em termos de eficiência em aproveitamento energético.
2	Tractz, Boschen e Rodrigues (2021)	Síntese e aplicação de TiO_2 em células solares: uma análise da proporção de isopropóxido de titânio	Química	Cerâmica	Sintetizar e avaliar morfologicamente o TiO_2 pela metodologia Pechini, utilizando isopropóxido de titânio ($C_{12}H_{28}O_4Ti$) em diferentes proporções, com posterior aplicação e análise eletroquímica de CSSCs contendo filmes preparados a partir das partículas de TiO_2 sintetizadas.	Verificou-se que a proporção molar cátion metálico:ácido cítrico de 2:1 apresentou partículas de menores diâmetros facilitando a adsorção do corante e potencializando os parâmetros fotoeletroquímicos.
3	Tractz *et al.* (2018)	Avaliação da adsorção e estudo eletroquímico de células solares produzidas com TiO_2 e corante extraído do *Hibiscus*	Química	Química Nova	Avaliar eletroquimicamente a célula produzida e propor um modelo de adsorção que explique o comportamento físico-químico do corante extraído do *Hibiscus* (*var. Sabdariffa*) sob solução etanoica acidificada, em partículas de TiO_2.	Todos os sistemas produzidos e estudados foram fotossensíveis apresentando uma densidade de corrente média de 0,35 mA cm^{-2}.
4	Dias *et al.* (2020)	Produção de óxido de cério pelo método de precipitação para aplicação em células solares sensibilizadas por corante	Química	Revista Virtual de Química	Estudar as variáveis no processo de obtenção do CeO_2 pelo método de precipitação, visando a aplicação em células solares sensibilizadas por corante.	Quanto menor o diâmetro das partículas de CeO_2 maior é a eficiência da conversão da energia solar em energia elétrica na aplicação em células solares sensibilizadas por corante.

Fonte: Dados SciELO e Periódicos CAPES (2021).

Quadro 1: Características gerais dos estudos selecionados na revisão integrativa (continuação)

	Autores /Ano da Publicação	Título da Publicação	Área Acadêmica dos Autores	Revista	Objetivo	Desfecho
5	Viomar *et al.* (2016)	Influência do método de obtenção de partículas de Nb_2O_5 empregadas em células solares sensibilizadas por corante compostas de TiO_2/Nb_2O_5	Química	Revista Virtual de Química	Estudar a influência de partículas de Nb_2O_5 obtidas por diferentes rotas sintéticas em células solares de TiO_2/Nb_2O_5 sensibilizadas por corante N719.	A CSSC contendo partículas de pentóxido de nióbio produzido via síntese hidrotermal foi 20% mais eficiente na conversão de energia solar em elétrica.
6	De Oliveira, Seery e Colleran (2017)	Células solares sensibilizadas com corante utilizando hibisco e suco de framboesa como tinturas	Química	The Journal of Engineering and Exact Sciences	Verificar a eficiência do uso de suco de framboesa e extratos de flores de hibisco como tinturas para DSSCs	É possível produzir células solares utilizando materiais de baixo custo, como os corantes produzidos a partir de flores de hibisco e suco de framboesa
7	Cruz *et al.* (2017)	Análise comparativa das propriedades de óxidos transparentes condutores para aplicação em células solares de filmes finos de CdTe	Engenharia de Materiais	Revista Matéria	Reduzir o número de etapas do processo de fabricação de filmes depositados à temperatura ambiente por pulverização catódica com rádio frequência	Dentre os materiais investigados, os filmes de ZnO:Al são a melhor alternativa para fabricação dos eletrodos frontais das células solares de filmes finos, por apresentarem valores de resistência e transmitância adequados a esta aplicação
8	Lima *et al.* (2017)	Caracterização de células solares de filmes finos de CIGS	Engenharia de Materiais	Revista Matéria	Apresentar os primeiros resultados de um programa colaborativo entre o Instituto Militar de Engenharia e o Florida Solar Energy Center, que visa à fabricação de células fotovoltaicas de CIGS	A maior eficiência foi, em geral, alcançada pelas células localizadas nas bordas do substrato, o que sugere variações na espessura da camada de CdS, causadas provavelmente pela agitação excessiva da solução precursora durante a deposição por banho químico.

Fonte: Dados SciELO e Periódicos CAPES (2021).

Quadro 1: Características gerais dos estudos selecionados na revisão integrativa (continuação)

	Autores /Ano da Publicação	Título da Publicação	Área Acadêmica dos Autores	Revista	Objetivo	Desfecho
9	Zanesco, Razera e Moehlecke (2017)	Análise da passivação com SiO_2 na face posterior e frontal de células solares com campo retrodifusor seletivo	Física	Revista Matéria	Apresentar o desenvolvimento e a análise da passivação na face posterior e frontal com diferentes espessuras de SiO_2, crescido por oxidação seca	É possível obter passivação eficaz no emissor e no campo retrodifusor seletivo com filmes finos de SiO_2 crescidos termicamente
10	Moehlecke *et al.* (2018)	Desenvolvimento de células solares n+ np+ em lâminas de silício de 100 µm de espessura	Física	Revista Matéria	Apresentar o desenvolvimento de células solares n+ np+ fabricadas sobre lâminas de silício Cz (Czochralski) com 100 µm de espessura	Foram desenvolvidas células solares n+np+ em lâminas finas da ordem de 100 µm, com a junção pn na face posterior e o emissor seletivo formado por difusão de boro e malha metálica de alumínio/prata.

Fonte: Dados SciELO e Periódicos CAPES (2021).

A análise dos estudos selecionados possibilitou a estruturação de duas categorias, conforme demonstrado no Quadro 2.

Quadro 2: Categorias do tipo de estudo

Células solares e seus materiais precursores	7, 8, 9, 10
Células solares sensibilizadas por corante	1, 2, 3, 4, 5, 6

Fonte: Dados SciELO e Periódicos CAPES (2021).

3.1. CATEGORIAS

3.1.1. CÉLULAS SOLARES E SEUS MATERIAIS PRECURSORES

Atualmente, a estrutura padrão de células solares de silício da indústria é produzida em lâminas de silício cristalino tipo p, crescido pelo método Czochralski (Si-Cz) (OSÓRIO; MOEHLECKE; ZANESCO, 2018). Estima-se que em 2011, 84% da produção mundial de células solares utilizou lâminas de silício cristalino tipo p dopadas com boro e em somente 3,9% foram usadas lâminas tipo n dopadas com fósforo (MOEHLECKE; CAMPOS; ZANESCO, 2017).

Para diminuir os custos vem sendo proposto e estudado o uso de silício de menor qualidade e a redução das espessuras atuais de 200 µm para 120 µm, além do

desenvolvimento de campo retrodifusor seletivo de alumínio e boro em células solares processadas em lâminas de silício tipo p para aumentar sua eficiência (MOEHLECKE; CAMPOS; ZANESCO, 2017; CRESTANI; ZANESCO; MOEHLECKE, 2018).

Apesar de sua boa eficiência (cerca de 24%), quando comparado a outros materiais, os dispositivos fabricados com esse material apresentam um alto custo de produção onde a lâmina de silício representa na ordem de 50% do valor final. Ademais, seu bom funcionamento depende dos pares elétrons-buracos fotoinduzidos, que estão correlacionados ao uso de materiais de alta pureza, o que encarece o produto (PACHECO *et al*., 2018).

Nesse sentido surgem os filmes finos, que são materiais que podem ser classificados em metálicos, não metálicos, orgânicos ou compostos, depositados sobre outro material, por processos físicos ou químicos, com espessura que varia de 1 a 100.000 Å (QUEIROZ *et al*., 2018). Os três materiais que dominam o mercado de células solares de filmes finos são: silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe) e disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) (LIMA *et al*., 2017).

Em conjunto a esses materiais, atuando como contato elétrico frontal, os óxidos condutores transparentes (OTCs) também são muito pesquisados devido a sua grande aplicabilidade em células solares e eletrônica invisível (MELO; SANTOS; SOUSA, 2016). Entre os OTCs, destacam-se o óxido de índio dopado com estanho (In_2O_3:Sn), o óxido de estanho dopado com flúor (SnO_2:F), o óxido de zinco dopado com o alumínio (ZnO:Al) e o estanato de cádmio (Cd_2SnO_4) (CRUZ *et al*., 2017). Além desses óxidos, levando em conta propriedades como alta mobilidade, transparência óptica, flexibilidade, não toxicidade e estabilidade ambiental, o grafeno e seus derivados, como o óxido de grafeno e o óxido de grafeno reduzido, tornam-se bons candidatos em inúmeras aplicabilidades, dentre elas as células solares (LIMA *et al*., 2018).

3.1.2. CÉLULAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR CORANTE (CSSCs)

Diferentes óxidos têm sido empregados nas CSSCs como: óxido de titânio (TiO_2), óxido de zinco (ZnO), óxido de estanho (SnO_2), óxido de nióbio (Nb_2O_5) etc. aplicados em junção com os mais diversos corantes, tanto comerciais quanto naturais. Sendo que o TiO_2 é o mais utilizado como eletrodo de trabalho (VALERIO *et al*., 2018). Feitosa *et al*. (2018) destacam o uso de filmes finos de óxido de titânio (TiO_2) nanocristalino e nanoporoso que apresentam propriedades fotovoltaicas e foram usados com sucesso em células solares com alta área superficial e incorporação de corantes e por esse motivo, tem sido estudado como uma rota alternativa para melhorar os dispositivos fotovoltaicos.

Recentemente, o ZnO, com gap semelhante ao TiO_2, aparece como um material alternativo para a fabricação de CSSCs de alta eficiência devido à alta transparência ótica na faixa do visível e ótima condutividade elétrica. Já o Nb_2O_5 tem a capacidade de minimizar efeitos de recombinação de carga pela formação de uma barreira de energia devido ao seu gap ser maior quando comparado aos outros semicondutores (VALERIO *et al*., 2018).

O corante sensibilizador mais empregado é um complexo polipiridínico contendo rutênio (Ru) tendo por características uma grande absorção em praticamente todo o espectro eletromagnético na região do visível e alta eficiência na transferência de carga devido ao forte acoplamento químico ao TiO_2 (DIAS *et al*., 2016).

Diferentes tipos de corantes têm sido testados e empregados como alternativa aos fotossensibilizadores à base de Ru, que vêm se tornando indesejáveis devido ao seu alto custo, raridade, procedimentos sintéticos complexos e impacto ambiental negativo (PEREIRA; CATALDI; SALCEDO, 2021).

Entre eles os corantes naturais extraídos de frutos, folhas, sementes, polpa e do caule de espécies de plantas como: *Euterpe oleracea, Arrabidaea chica, Bixa orellana, Genipa americana* e *Myrcia sylvatica* (AMÂNCIO *et al*., 2021); *Punica granatum* (GHANN *et al*., 2017); *Kigelia africana* (SHALINI, *et al*., 2018); *Celosia critata, Saffron* e *Cynoglossum* (HOSSEINNEZHAD; ROUHANI; GHARANJIG, 2018); entre outras.

Essas possuem metabólitos como antocianinas, curcuminas etc., moléculas fotossensíveis, que podem ser aplicadas nestes dispositivos. Possuem fácil metodologia de extração e geram células menos eficientes quando comparados aos corantes com rutênio, porém apresentam custo mais baixo (TRACTZ *et al*., 2020).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescente avanço da energia solar no Brasil e no mundo a consolidou como uma das principais fontes de energias renováveis hoje disponíveis, o que trouxe a necessidade de se investigar novas tecnologias para produzir células fotovoltaicas com maiores eficiências de conversão e a valores mais acessíveis.

As diversas pesquisas abordadas nesta revisão demonstraram que existem várias classes de células solares que convertem a luz solar em energia elétrica e que a eficácia da célula solar dependerá do tipo de material a ser utilizado. A tecnologia dominante atualmente é baseada no uso de células fotovoltaicas de silício mono e policristalino. Porém, o segmento de filmes finos emergentes vem ganhando espaço, em especial as células solares sensibilizadas por corante que têm sido amplamente testadas por sua alta eficiência, baixo custo, procedimento de preparação simplificado, além de utilizar pigmentos naturais tornando-as ambientalmente amigáveis.

Embora muitas pesquisas estejam sendo realizadas, desenvolver materiais com propriedades compatíveis à fabricação desses dispositivos não é tarefa fácil. Portanto mais estudos são necessários para garantir sua viabilidade de produção a nível de larga escala comercial.

REFERÊNCIAS

[1] AMÂNCIO, Moisés do Amaral et al. Corantes naturais da floresta Amazônica: potenciais aplicações em células solares fotosensibilizadas por corante. **Matéria (Rio de Janeiro),** v. 26, 2021.

[2] BENDER, Lívia Vasques et al. Estudo da paridade econômica e do desempenho energético de fachadas solares fotovoltaicas no extremo sul do Brasil. **Ambiente Construído**, v. 20, p. 489-508, 2020.

[3] BURSZTYN, Marcel. Energia solar e desenvolvimento sustentável no Semiárido: o desafio da integração de políticas públicas. **Estudos Avançados**, v. 34, p. 167-186, 2020.

[4] COSTA, André Luís Crispim; HIRASHIMA, Simone Queiroz da Silveira; FERREIRA, Reginaldo Vagner. Operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede: inspeção termográfica e limpeza de módulos FV. **Ambiente Construído**, v. 21, p. 201-220, 2021.

[5] CRESTANI, Thais; ZANESCO, Izete; MOEHLECKE, Adriano. Influência da passivação em células solares de silício com campo retrodifusor seletivo de alumínio e boro. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 14, n. 3, p. 236-242, 2018.

[6] CRUZ, Leila Rosa et al. Análise comparativa das propriedades de óxidos transparentes condutores para aplicação em células solares de filmes finos de CdTe. **Matéria (Rio de Janeiro**), v. 22, 2017.

[7] DE OLIVEIRA, George Nogueira; SEERY, Michael; COLLERAN, John. Células solares sensibilizadas com corante utilizando hibisco e suco de framboesa como tinturas. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 3, n. 4, p. 0665-0671, 2017.

[8] DIAS, Ivan Frederico Lupiano et al. Desenvolvimento de Dispositivos Fotovoltaicos e Diodos Emissores de Luz de Corantes Naturais: novos parâmetros de sustentabilidade. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 37, n. 2, p. 81-94, 2016.

[9] DIAS, Bianca Vanjura et al. Produção de óxido de cério pelo método de Precipitação para aplicação em células solares sensibilizadas por corante. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 3, 2020.

[10] FEITOSA, Antoniana Alves et al. Eletrodeposição de óxido de titânio. **DESAFIOS-Revista Interdisciplinar Da Universidade Federal Do Tocantins,** v. 5, n. Especial, p. 60-65, 2018.

[11] GHANN, William et al. Fabrication, optimization and characterization of natural dye sensitized solar cell. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 1-12, 2017.

[12] HOSSEINNEZHAD, M.; ROUHANI, S.; GHARANJIG, K. Extraction and application of natural pigments for fabrication of green dye-sensitized solar cells. **Opto-electronics review**, v. 26, n. 2, p. 165-171, 2018.

[13] LIMA, Andreza Menezes et al. Produção e caracterização de filmes finos transparentes e condutores de óxido de grafeno reduzido. Matéria (Rio de Janeiro), v. 22, 2018.

[14] LIMA, Renan de Melo Correia et al. Caracterização de células solares de filmes finos de CIGS. **Matéria (Rio de Janeiro),** v. 22, 2017.

[15] LOPES, G.; FRANCO, Ricardo AP; VIEIRA, Flávio HT. Algoritmo de Seguimento do Ponto de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaicos considerando Minimização de Erro e Derivada da Potência. **TEMA (São Carlos),** v. 21, p. 157-170, 2020.

[16] MELO, Adolfo Henrique Nunes; SANTOS, Jeferson Marques; SOUSA, Osmar Machado. Propriedades estruturais, ópticas e elétricas do sistema de multicamadas (ZnO/Nb) 3/ZnO e de co-deposição ZnO-Nb. **Scientia Plena**, v. 12, n. 7, 2016.

[17] MOEHLECKE, Adriano et al. Desenvolvimento de células solares n+ np+ em lâminas de silício de 100 μm de espessura. **Matéria (Rio de Janeiro),** v. 22, 2018.

[18] MOEHLECKE, Adriano; CAMPOS, Rodrigo Carvalho de; ZANESCO, Izete. Células solares finas em silício tipo n: avaliação de diferentes pastas metálicas para contato elétrico da face dopada com boro. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 14, n. 3, p. 250-256, 2018.

[19] OSÓRIO, V. C.; MOEHLECKE, Adriano; ZANESCO, Izete. Células solares bifaciais industriais em lâminas de silício finas: análise de passivação de superfícies e tipo de silício. **Cerâmica**, v. 64, p. 183-189, 2018.

[20] PACHECO, Jessica Crivelaro et al. Estudo das propriedades fotoeletroquímicas do poli (azo-Bismarck Brown R) obtido por eletropolimerização para sensibilização de células solares**. Colloquium Exactarum,** 2018. p. 51-65.

[21] PEREIRA, José Waltrudes Castanheira; CATALDI, Marcio; SALCEDO, Ivanovich Lache. Natural dye-sensitized solar cells: Case study with tropical organic pigments. **Environmental Progress & Sustainable Energy,** p. e13603, 2021.

[22] QUEIROZ, José César Augusto et al. Medição do gap óptico de filmes finos por meio das propriedades ópticas. **HOLOS**, v. 3, p. 446-455, 2018.

[23] RAMALHO, José Melquiades et al. Análise de teorias de enfermagem de Meleis: revisão integrativa. **Revista Brasileira de Enfermagem**, v. 69, p. 174-181, 2016.

[24] RAPHAEL, Ellen et al. Células solares de perovskitas: uma nova tecnologia emergente. **Química Nova,** v. 41, p. 61-74, 2018.

[25] ROSA, Eduardo Henrique dos Santos; BARROZO TOLEDO, Luiz Felipe Ribeiro. Uma revisão dos princípios de funcionamento de células solares orgânicas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, 2021.

[26] SHALINI, S. et al. Synergistic effect of sodium and yeast in improving the efficiency of DSSC sensitized with extract from petals of Kigelia Africana. **Optical Materials**, v. 79, p. 210-219, 2018.

[27] SOUZA, Marcela Tavares de; SILVA, Michelly Dias da; CARVALHO, Rachel de. Revisão integrativa: o que é e como fazer. **Einstein (São Paulo**), v. 8, p. 102-106, 2010.

[28] TRACTZ, Gideã T. et al. Avaliação da adsorção e estudo eletroquímico de células solares produzidas com TiO2 e corante extraído do Hibiscus. **Química Nova**, v. 41, p. 512-518, 2018.

[29] TRACTZ, Gideã Taques et al. Estudo de células solares híbridas de TiO2 com corantes naturais. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 4, 2018.

[30] TRACTZ, Gideã Taques et al. Células solares sensibilizadas por corante: perspectivas, materiais, funcionamento e técnicas de caracterização. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 3, 2020.

[31] TRACTZ, G. T.; BOSCHEN, N. L.; RODRIGUES, P. R. P. Síntese e aplicação de TiO2 em células solares: uma análise da proporção de isopropóxido de titânio. **Cerâmica**, v. 67, p. 83-89, 2021.

[32] VALERIO, Tatiana Lima et al. Study of the influence of Nb2O5 in ZnO solar cells. **Orbital: The Electronic Journal of Chemistry,** v. 10, n. 3, p. 234-238, 2018.

[33] VIOMAR, Aline et al. Influência do método de obtenção de partículas de Nb2O5 empregadas em células solares sensibilizadas por corante compostas de TiO2/Nb2O5. **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 3, p. 889-900, 2016.

[34] VITORETI, Ana Beatriz Ferreira et al. Células solares sensibilizadas por pontos quânticos. **Química Nova,** v. 40, p. 436-446, 2017.

[35] ZANESCO, Izete; RAZERA, Ricardo Augusto Zanotto; MOEHLECKE, Adriano. Análise da passivação com SiO2 na face posterior e frontal de células solares com campo retrodifusor seletivo. **Matéria (Rio de Janeiro),** v. 22, 2018.

Capítulo 8

Características técnicas de eletropostos alimentados com energia solar fotovoltaica

Mayara Cordeiro França

Resumo: Nos próximos anos as soluções energéticas voltadas à redução da emissão de CO2 tendem a estar mais presentes nas nossas vidas. A necessidade de desenvolvimento tecnológico que vise mitigar os impactos ambientais são pauta deste século. O desenvolvimento das fontes renováveis abre margem para pensarmos no processo de mobilidade urbana baseada na utilização de energia elétrica proveniente das fontes de energias renováveis. E, com o avanço da capacidade de armazenamento das baterias, bem como o desenvolvimento em pesquisa de carros elétricos com motores elétricos acoplados à transmissão dos carros, requer a necessidade das especificações técnicas para construção de estações de carregamento para carros totalmente elétricos. Atualmente este avanço está muito mais presente em outros países como a China, os Estados Unidos, a Alemanha e a Holanda. No Brasil, apesar de lento o avanço, é possível encontrar mais de mil pontos de carregamento segundo a ANEEL divulgado no final de 2022. A ABVE (Associação Brasileira de Veículos Elétricos) afirma que quase 5 mil unidades de carros elétricos foram emplacadas em abril de 2023. Portanto, é imperativo que haja profissionais qualificados para trabalhar com esse tipo de sistema que está em ascensão e expansão. Este trabalho tem como objetivo apresentar um panorama geral das principais características técnicas de funcionamento dos pontos de carregamento de carros elétricos a bateria e as principais modalidades de esquemas funcionais para este tipo de projeto de Engenharia Elétrica. Para isto utilizou-se embasamento técnico absorvido no curso de Eletrificação de carros ministrado pela plataforma da EdX DelftX University of Technology, da disciplina Fonte de Energia Elétrica: Energia Solar e Eólica, e das seguintes fontes acadêmicas: KHAN et al. (2018), DAS et al. (2019) e KOUKA et al. (2020).

Palavras-chave: sistema de carregamento, geração fotovoltaica, sistema *on-grid,* veículos elétricos a baterias.

1. INTRODUÇÃO

O sistema convencional de transporte que incorpora motor a combustão é o maior contribuidor da poluição do ar (DAS *et al.* 2019). As pesquisas se dedicam cada vez mais para o desenvolvimento de sistemas de mobilidade urbana mais sustentáveis. É evidente notar que não adianta utilizar a mobilidade elétrica com utilização de energia elétrica proveniente de fontes poluentes, como a termoelétrica. As fontes alternativas de energia devem contribuir com a alimentação do sistema de mobilidade elétrica atualmente proposto.

De forma a combater o aumento dos níveis de poluição atmosférica e suas externalidades negativas, o Brasil se comprometeu no Acordo de Paris a reduzir em 43% as emissões de gases do efeito estufa até 2030 (LIMA e BRIZON, 2019). Existem vários desafios para atender aos diferentes tipos de consumo dessa energia elétrica, os principais estão ligados a eficiência das baterias e ao modo de carregamento, que para algumas aplicações como frotas de ônibus o carregamento rápido é essencial para o adequado funcionamento desse tipo de carga.

Se pararmos para pensar no Brasil, podemos entender como os veículos elétricos podem trazer grandes benefícios para a logística nacional. Por se tratar de um país com dimensões continentais e existir uma grande dependência do sistema rodoviário, trazer para dentro do país soluções que permitem a mobilidade entre regiões por caminhões e/ou trens com sistema de propulsão baseado na energia elétrica e que essa energia seja proveniente de uma fonte sustentável, será um avanço significativo para a sociedade brasileira e trará ainda mais desenvolvimento para o país.

Os veículos elétricos foram desenvolvidos desde o início do século XIX, mas com a grande expansão dos veículos a combustíveis fósseis e o barateamento desse insumo energético, os veículos elétricos foram deixados para trás. Para reduzir a poluição do ar e minimizar a dependência dos combustíveis fósseis, as pesquisas voltaram a considerar a utilização da energia elétrica convertida para força motriz mecânica. Para que os benefícios da eletrificação extensiva dos transportes sejam reais, a energia elétrica que os alimenta deve ser proveniente de fontes limpas de energia (LIMA e BRIZON, 2019), como por exemplo proveniente de geração solar fotovoltaica.

O Fórum Econômico Mundial apresenta três principais tópicos para a transição dos veículos, o setor político e as tomadas de decisões, as instalações dos eletropostos no que tange a infraestrutura para atender a nova frota e a expansão dos veículos de transporte público que representam maior quantidade de quilômetros rodados. A *Bloomberg New Energy Finance* (BNEF) aponta que os veículos com bateria de 350kWh atendem às necessidades do transporte público das metrópoles brasileiras, que rodam em média 300 km/dia (LIMA e BRIZON, 2019).

Segundo DAS *et al.* (2019) alguns exemplos de modelos de veículos elétricos a bateria com capacidade acima de 300kWh são: Bolt, Model S, X e 3 da *Tesla* e Zoe da *Renault*. O Dolphin da *BYD* chinesa que chegou em 2023, após comprar a fábrica da *Ford Motors* em Camaçari tem a capacidade um pouco abaixo de até 290kWh.

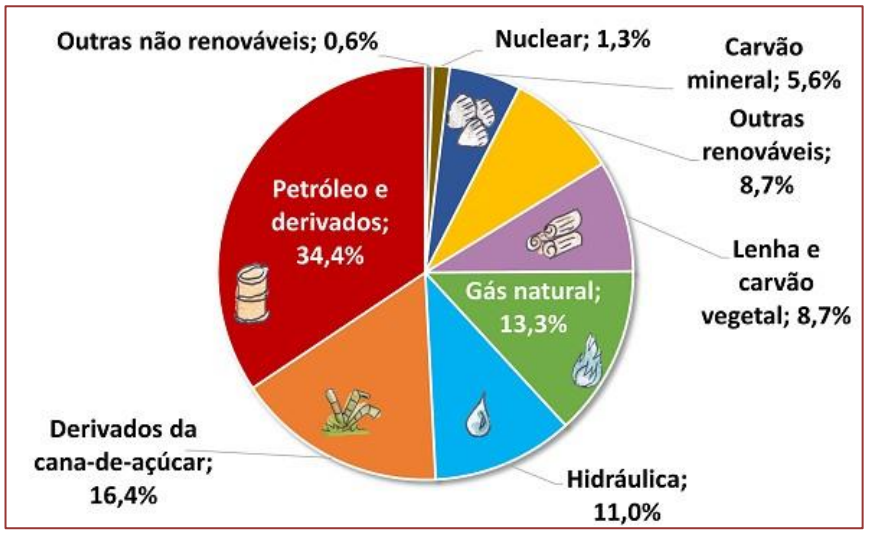
2. CONTEXTUALIZAÇÃO

GIBSON and KELLY (2009) apresentaram um estudo pela General Motors e pelo Laboratório de Warren de Química e Ciência ambientais em Michigan nos Estados Unidos sobre o carregamento de baterias de íon de lítio com energia solar fotovoltaica. É importante diferenciar os tipos de energia solar, pois pode-se converter tanto o calor quanto a luz em energia elétrica. No caso da energia fotovoltaica trata-se da conversão dos fótons da luz do sol em energia elétrica pela excitação da camada de valência dos materiais semicondutores de silício ou germânio que constituem os módulos fotovoltaicos.

A utilização de fontes de energia sustentável, justifica que os carros elétricos a bateria (*Battery Electric Car* - BEV) movidos a energia elétrica carregados da rede elétrica não são tão ambientalmente amigável porque sua fonte de energia não é renovável e ainda seria responsável pelas emissões de dióxido de carbono, o gás que causa o efeito estufa, se recarregado da eletricidade da rede convencional ainda parcialmente feita pela queima de combustíveis fósseis.

Neste quesito o Brasil se destaca positivamente, diferenciando-se da matriz energética mundial. A matriz energética brasileira é bastante renovável graças à queima de biocombustível da cana de açúcar, a energia hidráulica com as usinas hidrelétricas, aos parques eólicos e solar fotovoltaica. Como é possível constatar neste gráfico (pizza) apresentado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) na Figura 1.

Figura 1: Matriz energética do Brasil segundo o Balanço Energético Nacional de 2022
Total: 302 milhões de TEP - tonelada-equivalente de petróleo



Na literatura encontram-se estudos sobre modelos que avaliam os benefícios técnicos da aplicação de eletropostos urbano com fonte de energia fotovoltaica para carros elétricos buscando maior sustentabilidade na mobilidade urbana (BRENNA *et al.* 2014). Em TORRES & MILLAN (2018) verifica-se a análise de uma rede integrada com 6 estações de carregamento alimentadas com energia solar fotovoltaica e modelada para atender a demanda de utilização das estações simuladas a partir predições estocásticas baseada no modelo de Monte Carlo e a Cadeia de Markov, considerando o

tipo de carga, tempo de carregamento, dia e diferentes tipos de BEVs.

Estes tipos de estudo aprimoram os métodos de aplicação específicos para esta fonte com ênfase para o carregamento de baterias. Existem diversos parâmetros que devem ser satisfeitos. Isto é possível através da produção integrada de *hardware* e *software* de inversores de tensão (AC-DC) e conversores de tensão (DC-DC). Outro fato positivo da geração solar fotovoltaica é a descentralização da sua operação, possibilitando se localizar próximo das cargas. Fato que ameniza as perdas elétricas das linhas de transmissão, inerente à geração centralizada.

Neste sentido também é interessante a utilização controladores de energia nos níveis DC-DC para que a utilização da energia seja majoritariamente convertida em energia elétrica, evitando perdas por conversão em energia de corrente alternada, já que os módulos solares geram energia em corrente contínua e as baterias apresentam melhor desempenho de carregamento como o tempo de carregamento e a potência transferida quando alimentadas com este tipo de tensão. Neste sentido, não se pode deixar de considerar o impacto financeiro para manter um sistema *Off-grid* com baterias.

Portanto, o BEV pode ser melhor recarregado usando energia solar renovável de matrizes fotovoltaicas para fornecer a eletricidade para as baterias do veículo. Energia solar tem o potencial de suprir uma parcela cada vez maior do abastecimento de energia do mundo (GIBSON and KELLY, 2009). E em KOUKA *et al.* (2020) apresenta-se estratégia para a conexão de carros elétricos conectados à rede residencial com sistema de baterias. Em DAS *et al.* (2019) examina-se normativas sobre veículos elétricos, infraestrutura de carregamento e o impacto na rede convencional de energia com a inserção desse novo tipo de carga.

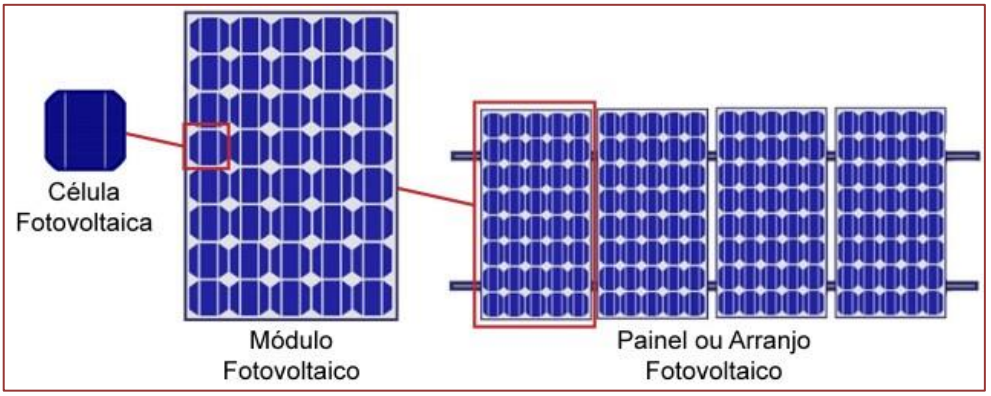
Em geral, a infraestrutura dos eletropostos de carregamento do BEV compreende na parte de potência e controle, bem como a comunicação. E pode ser classificado de acordo com os tipos de potência utilizada, acomodação do circuito do carregador (*On-board* ou *Off-board*), requisitos de contato físico (tipos de conexão determinado pelo tipo de tensão e corrente) e direção do fluxo de energia. Este trabalho consiste numa revisão bibliográfica sobre os estudos que tratam a geração de energia elétrica por módulos fotovoltaicos utilizados para abastecer a crescente demanda de veículos elétricos dedicados à mobilidade urbana.

3. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Os módulos fotovoltaicos são formados por células de silício, elemento básico para a transformação da radiação eletromagnética em energia elétrica e pode ser compreendida como um dispositivo semicondutor que produz uma corrente elétrica quando exposta à luz (SEGUEL, 2009). Este fenômeno físico-químico é chamado de efeito fotovoltaico ocorre em materiais semicondutores, sendo o silício (Si) o mais utilizado, onde cada átomo seu possui quatro elétrons em sua banda de valência (MATTOS, 2016).

O princípio de funcionamento das células fotovoltaicas depende do entendimento dos materiais semicondutores dopados, pois são caracterizados pela condução de energia quando expostos à radiação, diferentemente dos materiais não dopados que possuem um ótimo papel como isolantes elétricos (SEGUEL, 2009). Uma propriedade fundamental para as células fotovoltaicas é a possibilidade de fótons, na faixa do visível, com energia suficiente, excitar os elétrons à banda de condução (FRANÇA, 2017). Ao adicionar átomos pentavalentes haverá um elétron em excesso para formar as ligações covalentes, ficando fracamente ligado a seu átomo de origem. Nesse caso, necessita-se de somente uma pequena quantidade de energia para liberar este elétron para a banda de condução, algo em torno de 0,02eV (SEGUEL, 2009). O que caracteriza o material do tipo P (faltando um elétron) ou tipo N (com um elétron a mais). A figura 2 apresenta a diferença entre a célula, módulo e o arranjo fotovoltaico.

Figura 2: Composição do painel solar fotovoltaico



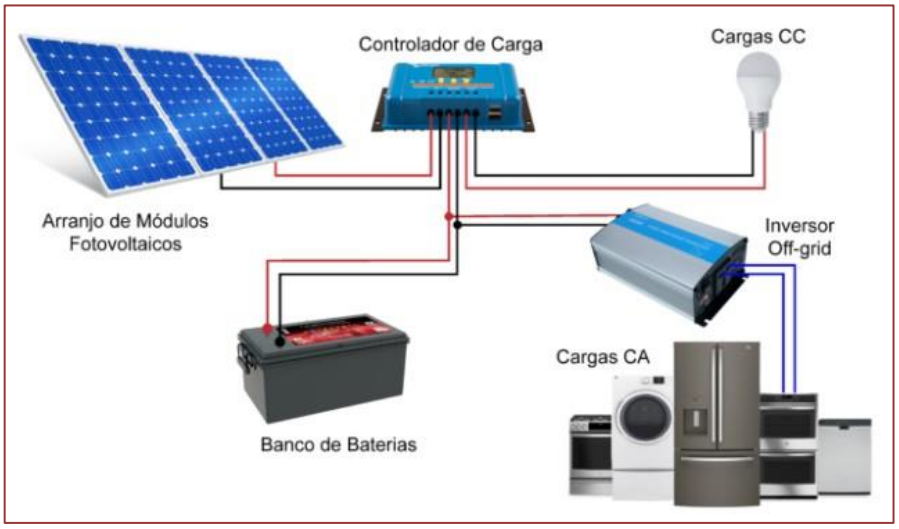
Fonte: Blog Eletrônica de Potência.

3.1. TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICO

Os sistemas fotovoltaicos podem ser caracterizados pela sua conexão, podendo ser conectados à rede ou isolados. Aqueles conectados à rede denominam-se *On-grid* proveniente do inglês conectado à rede e os sistemas isolados são os *Off-grid* desconectados à rede. Ou seja, podem estar ou não conectados à rede convencional de energia.

Observa-se na Figura 3, o sistema *off-grid* que possui um controlador de carga que conecta a bateria ao arranjo fotovoltaico e as cargas CC. Para utilizarmos carga CA depende do inversor de tensão (CC-CA). Para esse tipo de sistema os bancos de bateria podem implicar em gastos excessivos tirando a vantagem do sistema.

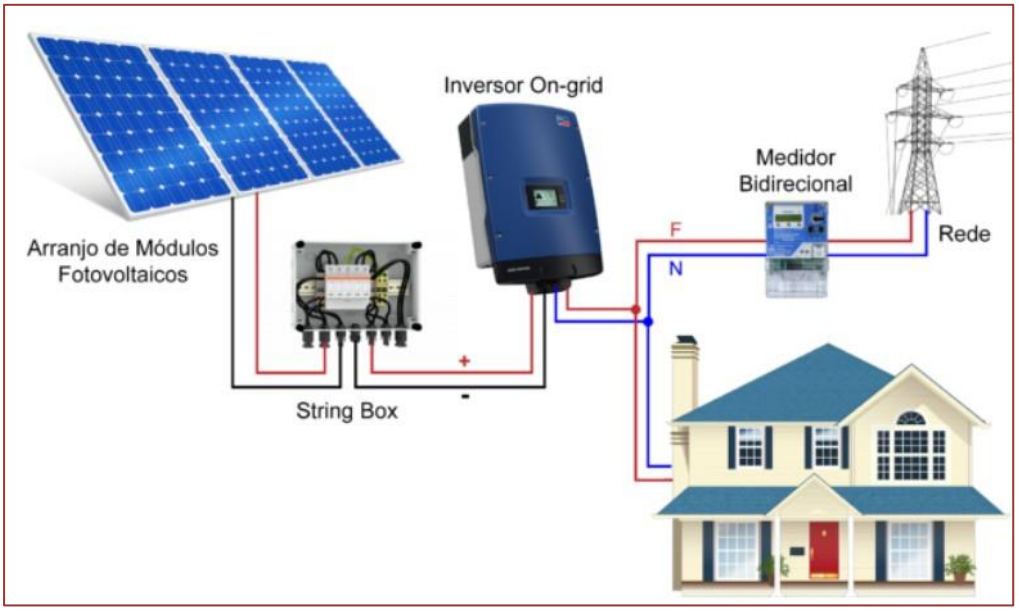
Figura 3: Instalação típica de um sistema fotovoltaico isolado



Fonte: Blog Eletrônica de Potência.

Já as baterias dos veículos elétricos seriam carregadas diretamente do controlador de carga, considerando como cargas CC, portanto, excluindo a necessidade do inversor de tensão. Isto não ocorre no sistema *On-grid* que requer o inversor de tensão para injetar a energia para a rede convencional de energia. Percebe-se que o tipo de inversor necessário para o sistema *On-grid* se diferencia principalmente porque deve atender a padrões de qualidade especificados por normas técnicas. Além de apresentar sistema de proteção do circuito diferenciados, quadro de seccionamento e medidor bidirecional.

Figura 4: Instalação típica de um sistema fotovoltaico *on-grid*.



Fonte: Blog Eletrônica de Potência.

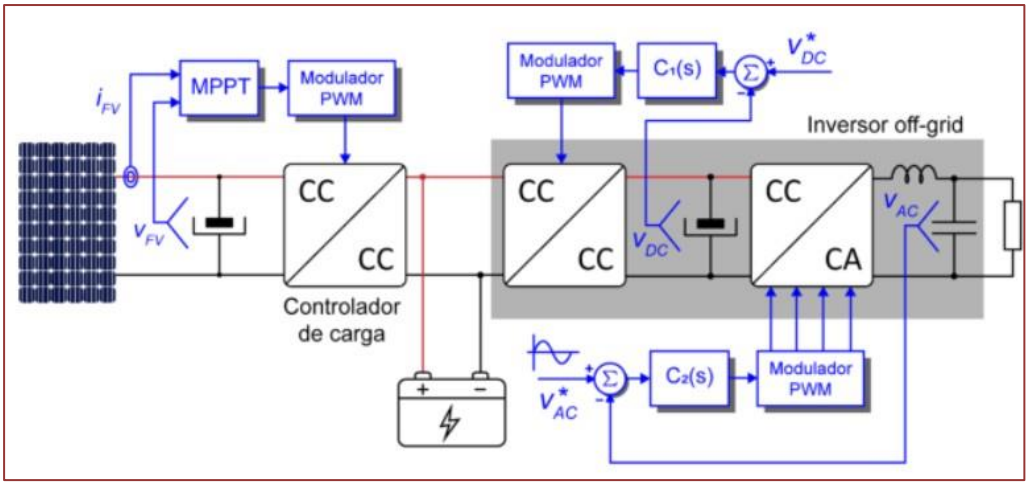
No Brasil os módulos devem ser posicionados em direção ao norte garantindo o maior aproveitamento da luz solar e da incidência ortogonal do raio solar. Normalmente encontramos ângulos entre 25° a 30º de inclinação, ângulos menores que 15º não são indicados, pois além da posição em direção ao raios solares, a inclinação também possibilita menor acúmulo de poeiras na superfície dos módulos. Caso não seja possível esta posição, as direções nordeste e noroeste também podem ser aplicadas por perdas menores que 10%. É possível calcular o ângulo da inclinação utilização a latitude acrescida um terço dessa mesma latitude.

3.1.1. CONTROLE DOS INVERSORES

O inversor *off-grid* possui um controlador CC-CC com modulação por largura de pulso para elevar a tensão das baterias, seguido de um estágio CC-CA para gerar tensão alternada na saída e alimentar as cargas elétricas de uma residência, por exemplo. Existe o controle do ponto máximo de potência transferida (MPPT) pelo controlador de carga e o inversor opera a partir do banco de baterias, tendo o controle da regulação da tensão no barramento CC por meio da malha de realimentação negativa apresentada na figura 5. Observa-se que a tensão do barramento CC é comparada a um valor de tensão VDC*, e o erro resultante é compensado por um controlador, de modo que a tensão fique igual à referência.

Para isso o controlador gera a razão cíclica necessária para chavear o conversor. Um controlador proporcional-Integral (PI) é normalmente empregado nesse tipo de circuito. Mas para assegurar menor distorção harmônica para a conversão em onda senoidal o controle PI não consegue fazer esse ajuste satisfatoriamente, então utiliza-se o controlador proporcional ressonante (P+RES), o qual utiliza uma parcela proporcional associada a um ou mais compensadores ressonantes sintonizados a frequência da rede, aqui no Brasil comumente de 60 Hz.

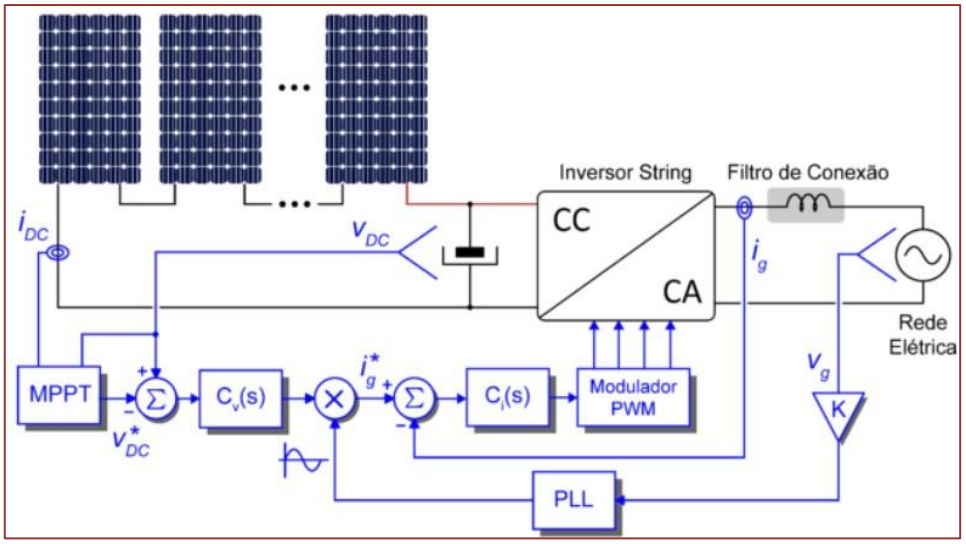
Figura 5: Controle aplicado ao inversor *off-grid*



Fonte: Moraes, 2020.

Quando tratamos dos inversores para conexão com a rede, acrescentamos os diversos itens de segurança e qualidade exigidos para injetar energia elétrica na rede. Normalmente o controle é efetuado através do controle da tensão ou corrente. Segundo PRODANOVIC & GREEN, (2002) apresentam um método que simula características de um gerador síncrono para controlar a injeção de potência ativa e reativa na rede. Entretanto, temos o ponto negativo de que a referência é a própria tensão da rede e esta pode apresentar muitos harmônicos. Para minimizar essa situação utiliza-se o algoritmo PLL (*Phase Locked Loop*) que captura a tensão da rede e fornece na saída uma forma de onda senoidal com baixo conteúdo harmônico e em fase com a tensão. Verifica-se a aplicação do PLL no circuito da figura.

Figura 6: Malha de controle do inversor *On-grid* do tipo string ou central



Fonte: Moraes, 2020

3.2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS A ELETROPOSTOS

Atualmente já é possível verificar sistemas fotovoltaicos integrados a posto de gasolina, sendo super fácil a integração com eletropostos. Neste caso o sistema está integrado à rede convencional (*On-grid*) temos a simples missão de colocar sistemas de carregamento *Off-board* para controlar o carregamento da rede convencional para os carros.

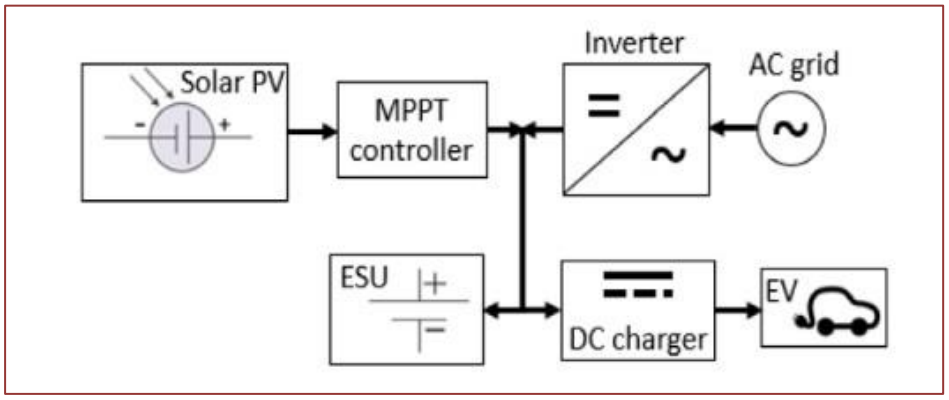
Já os sistemas que são dedicados para o carregamento de carros elétricos a bateria podem contar com sistema de bateria própria para o acúmulo da energia gerada durante o dia e o carregamento das baterias de carro quando houver demanda, podendo ocorrer não somente durante os períodos de geração. Neste sentido podemos perceber as diferentes características da operação dos eletropostos por alimentação fotovoltaica. Existem diversas possibilidades sendo pensadas pelos pesquisadores, inclusive a utilização da carga nas baterias dos carros como fonte de energia para residências e até mesmo carregamento de uma bateria sem carga por outro carro elétrico carregado. As possibilidades de funcionamento são diversas e podem entregar para os usuários um serviço diferenciado daqueles encontrados na utilização de combustíveis fósseis.

Dentre as vantagens técnicas, a possibilidade de mitigar as perdas na transmissão mecânica do acoplamento entre motor e eixo. Sugere acoplar o motor elétrico trifásico diretamente no eixo de transmissão dos carros. A conversão de energia elétrica para a mecânica no acoplamento de motor trifásico e transmissão é altamente eficiente.

4. CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA

Quando se trata de um sistema solar para carregamento de um veículo elétrico, existem pelo menos 10 modos diferentes de operação desse sistema, apresentados todos por KHAN *et al.* (2018). Dentre os assuntos abordados, os autores mostram o modo de operação caracterizado pelo fluxo de potência provenientes de um sistema solar que pode ser utilizado para carregar o veículo elétrico, carregar baterias do eletroposto e caso a potência solicitada seja insuficiente pode solicitar a rede convencional, como é possível constatar na figura 7, devidamente indicado os sentidos do fluxo de potência pela flechas.

Figura 7: Modo de carregamento de um sistema com fonte fotovoltaica



Fonte: Khan *et al.* (2018).

Os algoritmos de controle do sistema buscam atender a todas as possibilidades da demanda da rede. As principais categorias das estações de carregamento são: estação pública, estação semi-privada (ex, locais de trabalho, condomínios) e estação privada (residencial). Cada categoria implicará em diferentes impactos na rede por tratar de cargas funcionando de forma diferente (KOUKA *et al.* 2020).

A solicitação de potência para carregamento das baterias utiliza como fonte a energia acumulada nas baterias do eletroposto, utiliza energia convertida da rede de distribuição ou recebe diretamente da geração. Estes modos de funcionamento e do fluxo de potência apresentam as diversas configurações que o sistema de carregamento pode desempenhar e como os módulos de controle devem considerar os diversos modos de operação. A seguir será apresentado na seção sobre tipos de conectores como a conexão de informação entre o módulo de carregamento e o módulo de gerenciamento da bateria é importante para o correto funcionamento do sistema e todas as suas particularidades operacionais.

Além das características apresentadas, outras configurações evidenciam a possibilidade de carregamento de um veículo utilizando a carga de outro veículo ou a alimentação residencial proveniente da energia acumulada na bateria do carro elétrico. Neste ponto pode-se observar diversas vantagens do sistema de carregamento mostrando a utilização eficiente da energia gerada pelas células fotovoltaicas.

5. TIPOS DE CARREGAMENTO

A estruturação do sistema de carregamento dos carros elétricos é um fator preponderante para o aumento da frota de carros elétricos em um país, estado ou município. O investimento para que essa estrutura seja empregada dependerá de incentivos públicos e privados alinhados com o objetivo ambiental de utilizar um meio de transporte com menos emissão de gases na atmosfera mitigando o efeito estufa.

Tabela 1: Principais classificações das estruturas de carregamento

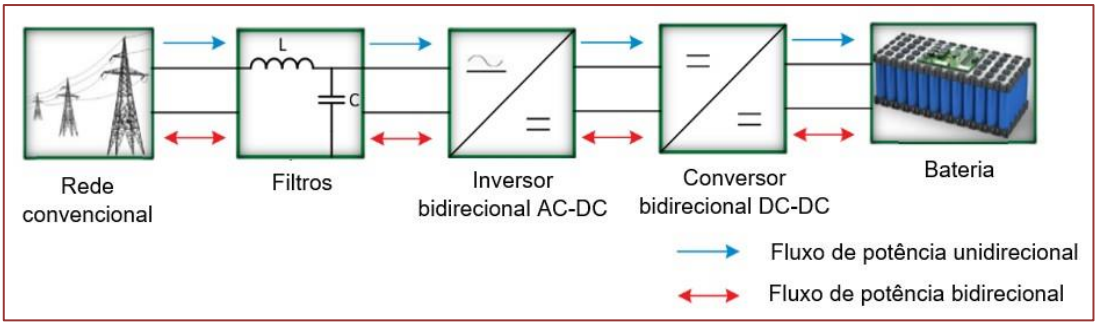
Tipo da alimentação	Acomodação do módulo de carregamento	Contato físico	Direção do fluxo de potência
Corrente Alternada	No veículo (Onboard)	Carregamento lento por contato	Unidirecional ou bidirecional
Corrente Contínua	Na estação de carregamento (*Offboard*)	Carregamento rápido por contato	Unidirecional ou bidirecional
Corrente Alternada	Sem fio (indução)	Transferência de potência sem contato	Unidirecional

FONTE: DAS *et al.* (2019) modificado.

As estruturas de carregamento são caracterizadas principalmente pelo tipo da alimentação, a localização do módulo de carregamento, a estrutura de contato se é por condução elétrica ou indução e também pela direção do fluxo de potência desses sistemas. A tabela 1 apresenta uma breve classificação considerando estes quatro aspectos. Os métodos de carregamento das baterias são por corrente alternada, corrente contínua, indução e estação de troca (*swap station*).

O carregamento por corrente alternada é a que possui menor custo e também é muito útil para estações de carregamento com energia solar *On-grid*, esquema apresentado na Figura 8. Possui diferenças no nível de tensão e frequência, a depender das características das concessionárias.

Figura 8: Modo de carregamento de um sistema com fonte fotovoltaica

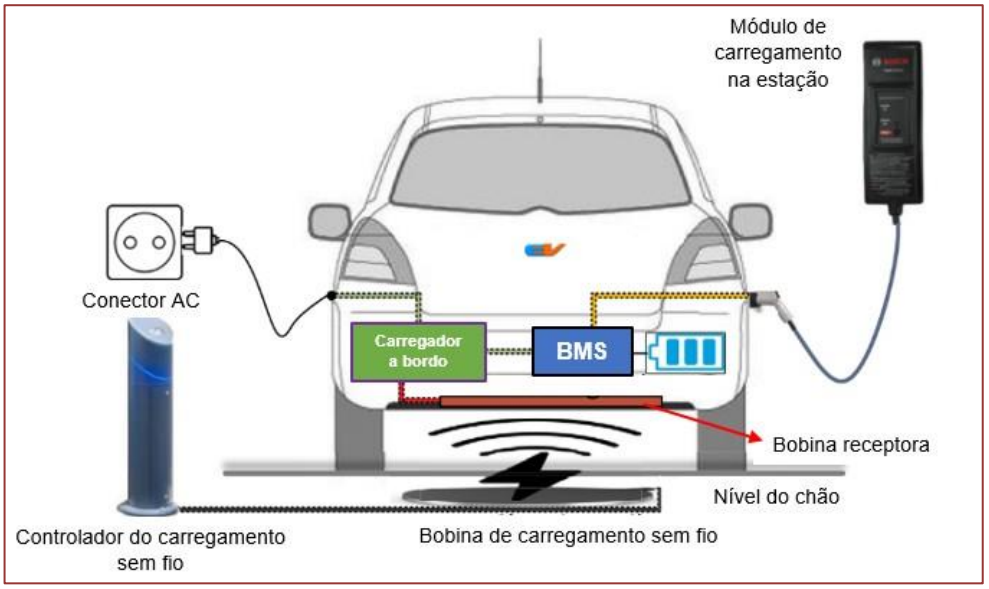


FONTE: DAS *et al.* (2019) modificado.

A estação de carregamento de corrente contínua apresenta a vantagem de desempenhar uma transferência de potência mais rápida e com maior capacidade de potência de carregamento, entretanto possui maior custo para aquisição e instalação (KHAN *et al.*, 2018). Tratando-se da geração fotovoltaica o carregamento em corrente contínua deve ocorrer durante a geração ou com banco de baterias do eletroposto que torna mais onerosa sua operação.

O carregamento por indução se dá através da energização de bobinas fora do carro com acoplamento magnético de bobina receptora no carro e o princípio de funcionamento é semelhante ao funcionamento do transformador (Figura 9). Segundo DAS *et al.* (2019) este método de carregamento é conveniente para transferência de energia entre as estações de carregamento e os veículos elétricos.

Figura 9: Possibilidades de acomodação dos módulos de carregamento



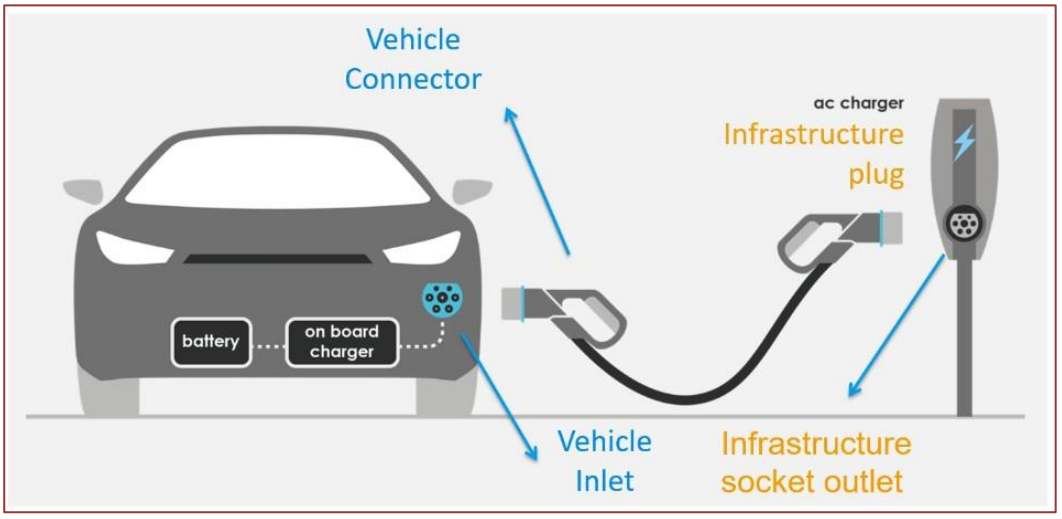
Fonte: Das *et al.* (2019).

Observa-se na Figura 9 as três principais alternativas de carregamento, desconsiderando a estação de troca. O BMS (*Battery management system*) é o sistema de gerenciamento da bateria. Este sistema é responsável por controlar os parâmetros físicos de carregamento. Também pode ser nomeado como *Battery controller charging module* (BCCM). É importante salientar que os eletropostos serão distribuídos gradativamente, aumentando cada vez mais a vias que possibilitem os usuários recarregarem as baterias dos seus veículos para continuar o translado.

5.1. CORRENTE ALTERNADA

O carregamento por corrente alternada permite o carregamento de veículos elétricos utilizando uma estação de carregamento de baixo custo que utiliza a energia elétrica diretamente da rede de distribuição para o carro (Figura 10). Pode-se utilizar o sistema monofásico ou trifásico, nível de tensão, frequência variam de país para país. Neste tipo de carregamento pode-se incorporar o sistema fotovoltaico *On-grid* já que este irá injetar energia na rede.

Figura 10 – Estrutura de carregamento de corrente alternada. *Vehicle connector*: Conector veicular; *On board charger*: controlador de carregamento encontra-se dentro do veículo; *Vehicle inlet*: padrão de encaixe do conector; *Infrastructure socket outlet*: Infraestrutura externa com conector



Fonte: EDX, 2023.

Esta estação utiliza um retificador para converter a tensão elétrica alternada para contínua para carregamento da bateria. O carregamento dar-se-á por conexão elétrica que utiliza um soquete apropriado para efetivar a conexão, de forma a garantir que as características requeridas pela bateria sejam atendidas. Não existe um padrão mundial de conexão. Cada país ou empresa produz seus conectores considerando as características de carregamento.

Este é um ponto bem importante que as estações de carregamento devem caminhar para uma padronização conforme a quantidade de usuários cresça. Neste tipo de estação, o módulo de carregamento e retificador estão dentro do carro. É importante salientar que

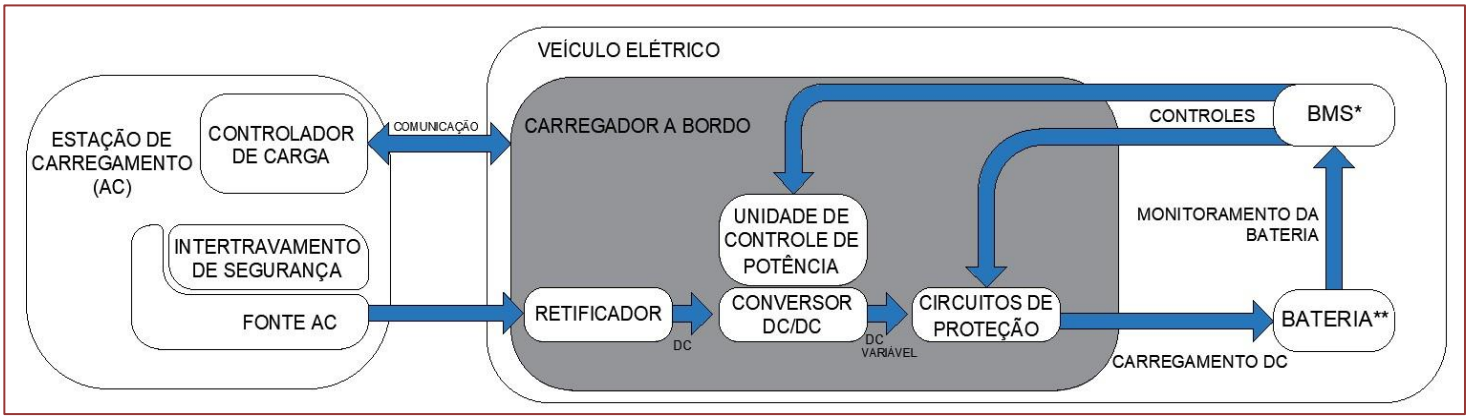
estes equipamentos devem ser desenvolvidos pela equipe de engenharia de forma que atenda as características necessárias, dentre as principais, encontra-se: peso, tensão, corrente e tipo de bateria.

5.1.1. OPERAÇÃO DE CARREGAMENTO COM TENSÃO ALTERNADA

Para iniciar a operação de uma estação de carregamento com um veículo elétrico neste método de carregamento é imprescindível que haja compartilhamento de informações entre a estação e o veículo e que a conexão elétrica estabelecida seja segura. Quando estes fatores forem atendidos, o controlador de carga da estação que obteve informações técnica inerentes do carro iniciará o processo de carregamento, detalhado a seguir:

1. Quando o veículo for conectado à estação de carregamento, o controlador de carga da estação irá se comunicar com o do veículo. Informações sobre a conectividade, condições de falhas, limite de corrente são compartilhadas entre a estação e o veículo;
2. O sistema de controle inserido no carro irá retificar a onda senoidal da fonte alternada para tensão contínua;
3. A unidade de controle de potência conectado ao sistema de gerenciamento da bateria irão estabelecer as condições de específicas carregamento com entrada de sinais de potência no conversor DC-DC;
4. Para finalizar, existe um circuito de proteção responsável por limitar as condições de operação do carregamento da bateria, limitando os parâmetros de operação e isolando a bateria se necessário.

Figura 11: Sistema de operação do carregamento por tensão alternada



*Battery management system (sistema de gerenciamento da bateria).

** Bateria do carro elétrico (alta tensão).

Fonte: EDX, 2023 (modificado).

O sistema de operação do carregamento da bateria de alta tensão, apresentado na figura 11, é alimentado por retificador e conversor DC-DC onde eleva o nível de tensão para a solicitada pela bateria. Portanto, o sistema de gerenciamento da bateria é um módulo muito importante que supervisiona o funcionamento e carregamento da bateria. Este sistema também será necessário para realizar os controles de solicitação de torque e sistema de transmissão.

5.2. CÁLCULOS DE ELETROPOSTO DE CORRENTE ALTERNADA

Para determinar a potência da estação de carregamento em tensão alternada, primeiramente devemos estabelecer os parâmetros do sistema de distribuição. Considerando um sistema trifásico, alimentando com 13,8 kV no lado da alta tensão e baixa para 0,22/0,127 kV. Outra configuração muito difundida no Brasil, principalmente nas indústrias, é de 0,38/0,22 kV. Podemos utilizar as seguintes equações para calcular a potência para o sistema monofásico e trifásico.

$$P_{ch} = V_{ac1\phi} \times I_{ac} \quad (1)$$

$$P_{ch} = \sqrt{3V_{ac3\phi}} \times I_{ac} \quad (2)$$

Portanto, considerando uma corrente de 10ª teremos para o circuito monofásico F-N com tensão de 0,22kV uma potência de 2,2kW. E para a configuração trifásica com tensão F-F de 0,38 kV teremos aproximadamente 6,6kW.

5.2.1. TEMPO DE CARREGAMENTO

É possível determinar o tempo de carregamento da estação, assumindo o fator de potência unitário e negligenciando todas as perdas, podemos determinar seguindo as seguintes equações:

$$E_{bat} = P_{ch} \times t_{ch} \quad (3)$$

$$t_{ch} = \frac{E_{bat}}{P_{ch}} \quad (4)$$

Onde, Pch - Potência de carga (kw);

Tch - Tempo de carregamento (h);

Ebat - Energia entregue a bateria em kWh.

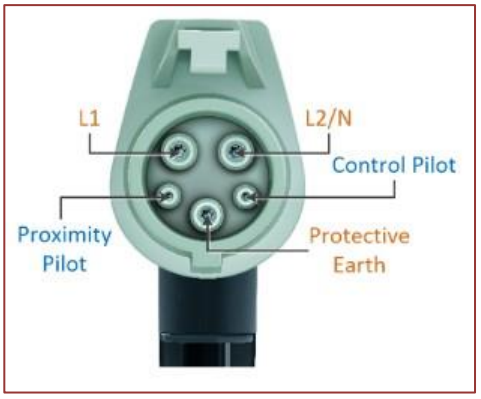
6. TIPOS DE CONECTORES

A indústria de carros elétricos é recente e os padrões de conectores para carregamento ainda não foram difundidos. Por isso que alguns fabricantes e países desenvolveram seus próprios modelos considerando formato, dimensão e configuração das conexões. Existem 3 tipos vastamente utilizada no mundo:

- Tipo 1: Utilizado no Japão e nos Estados Unidos;
- Tipo 2: Utilizado na Europa;
- Tipo 3: Utilizado também na Europa, mas está entrando em desuso pela substituição do tipo 2;

A China tem seu próprio padrão de conector para carro elétrico, que se assemelha com o tipo 2. Utilizado para tensão alternada monofásica ou bifásica, pode-se utilizar fase-neutro ou fase-fase nos terminais de alimentação (L1/L2/N).

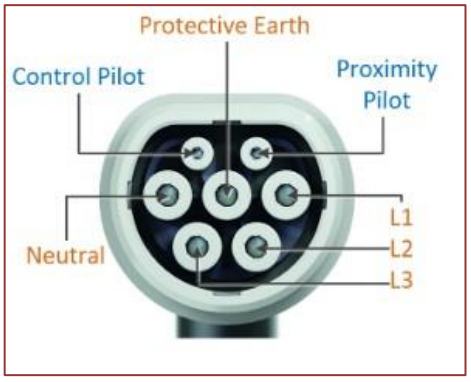
Figura 12: Tipo 1



Fonte: EDX course, 2023.

Na Figura 12 existem dois pinos de conexão que envia e recebe sinais para identificação e comunicação do nível de carga da bateria, informando ao controlador de carga os dados necessários para efetivar o carregamento adequadamente. A faixa de tensão que este conector suporta é de 120-240V e corrente de até 80A.

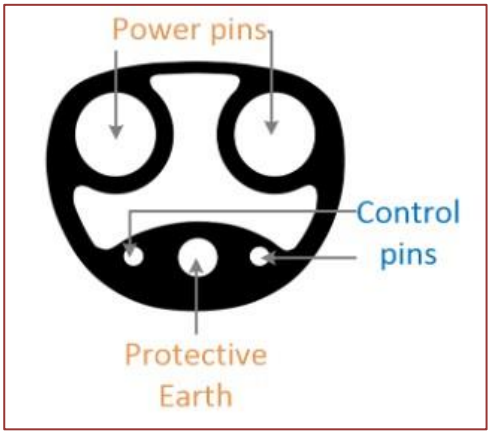
Figura 13: Tipo 2



Fonte: EDX course, 2023.

O tipo de conector apresentado na Figura 13 possui duas conexões pequenas utilizado para a comunicação entre o controlador de carga e a bateria. E possui cinco grandes pinos destinados à conexão trifásica, neutro e aterramento. Pode ser utilizado nas configurações de rede monofásica, bifásica ou trifásica, bem como tensão contínua no mesmo conector. Foi normatizado pela Associação de Indústria Automotiva da Alemanha (VDA) através da VDE-AR-E 2623-2-2 e é recomendada pela Associação Europeia de manufatura automobilística (ACEA) em 2011. Os níveis máximos de operação são: 230V com corrente máxima de 80A, e 400V trifásico com corrente de 63A.

Figura 14: Tipo 3



Fonte: EDX course, 2023.

O conector da Tesla utilizado nos Estados Unidos para carregamento tanto com tensão alternada como contínua, possui dois pinos de potência, dois pinos de sinais e uma conexão para o aterramento. Muito similar ao conector do tipo 1. Combina em um único conector a possibilidade de carregamento com os dois tipos de tensões. Este conector não permite a conexão trifásica. Suporta tensão de 240 alternada e corrente máxima de 70A.

OBS: Existem conectores que já possuem uma capacidade de até 350A de condução com um range de tensão de 200-1000V. Estes valores estão continuamente em desenvolvimento visando o rápido carregamento.

7. CONCLUSÃO

Compreende-se que as tecnologias que servem a utilização de um carro totalmente elétrico estão sendo postos em prática, ainda existem desafios para aprimorar tais tecnologias como os sistemas de carregamento mais eficientes e principalmente melhorar a capacidade das baterias de alta tensão. É importante perceber como os tempos estão mudando e que não queremos desenvolver tecnologia apenas, mas objetivamos também atender as demandas derivadas do meio ambiente. A diminuição da poluição do ar é não somente uma causa que a terra solicita, mas também para a nossa própria saúde.

A utilização de estações de carregamento com alimentação da energia fotovoltaica é um passo muito positivo e promissor. Pesquisar sobre o carro elétrico consistiu numa experiência indescritível. Pensar na capacidade das baterias, no conversor (DC-DC) e inversor (AC-DC) bidirecionais, módulos de controle e principalmente o gerenciamento de todo esse sistema incorporado às demandas do motor elétrico trifásico é um trabalho dinâmico que exige desenvolvimento de *hardware* e *software* que trabalhem em sintonia com o sistema, identificando seus parâmetros de funcionamento e interagindo com todos os subsistemas.

Os tipos de carregamento trazem algumas características intrínsecas ao tipo de alimentação e nível de tensão. Todas essas especificações estão em constante mudança em função do desenvolvimento e resultados das pesquisas, objetivando encontrar os valores otimizados para os melhores ajustes do sistema. Também solicita interface com telecomunicações com a utilização de sistemas de comunicação, rede CAN (*Controlle Area Networking*), até o controle por internet.

Durante o período da graduação (2013-2018), os carros elétricos ainda eram algo pouco tangível, e mesmo tendo o primeiro carro elétrico desenvolvido no mesmo período dos carros a combustão, perceber a necessidade de pensar em tecnologias sustentáveis que oportunizem novas formas de habitar neste planeta, observando seus ciclos e percebendo os sinais que a natureza impõe. Não podemos deixar os olhos fechados e não ver o quanto a poluição é um marco triste da nossa humanidade. É pulsante a necessidade mundial e brasileira de que sistemas sustentáveis estejam em pleno funcionamento como resultado de trabalhos de engenharia.

REFERÊNCIAS

[1] ABVE - Associação Brasileira de Veículo Elétrico - http://www.abve.org.br/.

[2] DAS, H.S., RAHMAN, M. M., LI, S. and TAN, C. W., **Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review**, in Renewable and Sustainable Energy Review, ELSEVIER, 2019, https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109618.

[3] LIMA, G. C. L. S. e BRIZON, L. C., "**Perspectivas e desafios da eletromobilidade no transporte público**", BOLETIM ENERGÉTICO, setembro de 2019, FGV ENERGIA.

[4] GIBSON, T. L., and KELLY, N. A., **SOLAR PHOTOVOLTAIC CHARGING OF LITHIUM-ION BATTERIES**, General Motors R&D Center, IEEE, 2009. ISSN 978-1-4244-2601-0/09.

[5] EPE, BALANÇO DE ENERGIA NACIONAL - BEN 2022.

[6] BRENNA, M., DOLARA, A., FOIADELLI, F., LEVA, S. and LONGO, M., "**Urban Scale Photovoltaic Charging Stations for Electric Vehicles**" in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, no. 4, pp. 1234-1241, Oct. 2014, doi: 10.1109/TSTE.2014.2341954.

[7] TORRES, E. M. G. and MILLAN, I. A. I., "**Optimal Demand Response for the Recharging of Electric Vehicles in Micro-Networks Type of Service Station by Allocation of Energy Resources**," 2018 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS), Quito, Ecuador, 2018, pp. 150-157, doi: 10.1109/INCISCOS.2018.00029.

[8] KOUKA, K., MASMOUDI, A., ABDELKAFI, A., KRICHEN, L., **Dynamic energy management of an electric vehicle charging station using photovoltaic power,** Sustainable Energy, Grids and Networks, Volume 24, 2020, 100402, ISSN 2352-4677, https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100402.

[9] SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnicas MPPT e controle digital.** UFMG. Belo horizonte, Agosto de 2009.

[10] MATTOS, G. M. **Estudo de rendimento e temperatura de painéis fotovoltaicos com uso de técnica de concentração solar.** UFRG, Rio de Janeiro, Abril de 2016.

[11] FRANÇA, M. C., **AVALIAÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA POR SISTEMA DE ARREFECIMENTO CONVECTIVO**, TCC, IFBA 2017. Disponível em: <https://portal.ifba.edu.br/paulo-afonso/cursos/engenharia-eletrica/TCC-EE/2017/tcc-mayara-cordeiro- franca-2017.pdf/view>.

[12] MORAES, C. **BLOG ELETRÔNICA DE POTÊNCIA: CÉLULAS FOTOVOLTAICAS,** 2020.

[13] PRODANOVIC, M. & GREEN, T. C., "**POWER QUALITY IMPROVEMENT IN GRID CONNECTION OF THREE PHASE INVERTERS**", IEEE Power Eletroctonics Machines and Drives, 2002.

[14] KHAN, S., AHMAD, A., AHMAD, F., SHEMAMI, M. S., ALAM, M. S. & KHATEEB, S. "**A Comprehensive Review on Solar Powered Electric Vehicle Charging System**", Smart Science, 6:1, 54-79, DOI: 10.1080/23080477.2017.1419054, 2018.

[15] EDX, **Electric cars: Technology. Da Universidade técnica de Delft**, Países Baixos, 2023.

[16] SUDARSHAN, S. B., ARUNKUMAR, G. "**Isolated DC-DC Power Converters for Simultaneous Charging of Electric Vehicle Batteries: Research Review, Design, High-Frequency Transformer Testing, Power Quality Concerns, and Future. Sustainability"**. 2023; 15(3):2813. https://doi.org/10.3390/su15032813.

[17] MARQUES, T. F. R. P. F. M., **Projeto de uma Estação de Carregamento Solar para Bicicletas Elétricas,** 2019, Universidade de Lisboa. SAM VERSÃO: 2018.11.11 r4. NREL - National Renewable Energy Laboratory.

[18] VARGAS, T. do N., PRYM, G. C. S., VILLALVA, M. G., MACHADO, G. M. V, **REVISÃO DE SISTEMAS DE CARREGAMENTO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS UTILIZANDO SISTEMAS FOTOVOLTAICOS,** viii Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, 2020.

Capítulo 9

Otimização no transporte urbano: uma simulação intermodal com ênfase na eficiência energética

Shadia Silveira Assaf Bortolazzo
João Eugênio Cavallazzi
Amir Mattar Valente

Resumo: De um modo geral, pode-se afirmar que os padrões de produção e consumo de energia vêm sendo baseados nas fontes fósseis, o que gera emissões de poluentes locais, gases de efeito estufa (GEEs) e põem em risco o suprimento energético de longo prazo no planeta. No âmbito do transporte urbano, as cidades brasileiras se desenvolveram com ênfase no modo rodoviário. Assim, é relevante estudar a eficiência energética no transporte, para implementar boas soluções, que atendam os deslocamentos dos usuários, e promovam o uso eficiente dos recursos naturais. O objetivo geral deste artigo é estimar, em uma rede de transportes teórica, a eficiência energética do deslocamento de uma determinada demanda de passageiros, utilizando diferentes modos de transporte, a fim de medir a eficiência energética da rede. Especificamente, pretende-se verificar e comparar o consumo de energia e as emissões de gás carbônico no transporte intermodal, pelos modos ferroviário – Veículo Leve sobre Trilhos (VLT) e rodoviário - ônibus. A metodologia foi desenvolvida com base em pesquisa documental e bibliográfica para levantamento de dados, e aplicada técnica de pesquisa operacional para avaliação da eficiência energética da rede simulada. A revisão abrange o estudo do transporte, sua indispensabilidade e influência no meio ambiente. São abordadas a eficiência energética na matriz de transporte e o uso de pesquisa operacional como ferramenta de apoio para modelos de otimização. Ao final, foi possível identificar que a integração modal, sistema alimentador – distribuidor – é uma solução eficiente quanto ao consumo de energia e emissões de GEEs. A metodologia, mostrou-se satisfatória e pertinente, podendo ser utilizada para redes maiores e cenários reais. Como continuidade deste estudo está sendo desenvolvida uma contribuição metodológica para planejamento sustentável de transporte urbano de passageiros (MPTS-URB), a qual pretende estimar o custo monetário da eficiência energética a partir de dados de emissão de poluentes e consumo de energia pelos modos de transporte utilizados na rede.

Palavras-chave: Otimização, Transporte Intermodal, Transporte Ferroviário, Eficiência Energética.

1. INTRODUÇÃO

O transporte é essencial a vida moderna. É ele que torna possível a maior parte das atividades sociais e econômicas. Entretanto, apesar de indispensável, o transporte também influi no meio ambiente, visto ser uma atividade que demanda interferências no meio físico natural, para a implantação de sua infraestrutura, e consumo de energia e combustíveis, para sua operação (D`AGOSTO, 2015).

Em 2012, o Brasil sediou a Conferência das Nações Unidas para o desenvolvimento sustentável (RIO +20), o encontro abordou assuntos sobre a conscientização da sociedade para a urgência de tratar de maneira responsável o meio ambiente, além disso, trouxe para o centro dos debates a Economia Verde[1], forma mais concreta de economia para progredir na direção do Desenvolvimento Sustentável[2].

O transporte de passageiro faz parte dos temas abordados na Economia Verde, no qual um dos princípios é a mudança para modelos ambientalmente mais eficientes de transporte – sistemas coletivos, trens urbanos, metrôs e não motorizados. Segundo o relatório de Economia Verde do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) o investimento de apenas 0,16% do PIB global no transporte verde reduziria as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em até 70% das emissões do setor de transporte até 2050, repercutindo também na redução em um terço a quantidade de veículos no modal rodoviário e o consumo de derivados de petróleo (UNEP,2011).

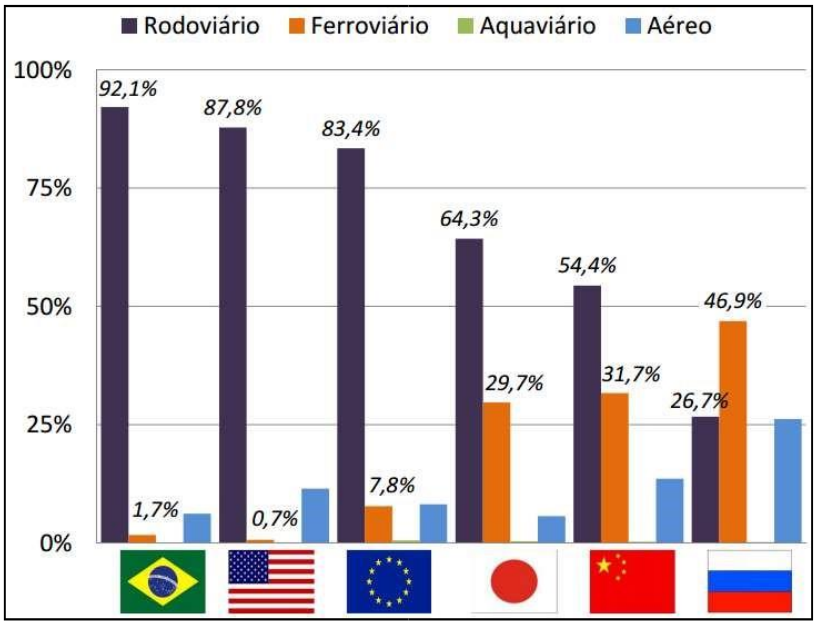
Nesse contexto, o transporte ferroviário pode ser um importante aliado tanto para a melhoria da mobilidade urbana quanto para o meio, principalmente porque atende uma alta capacidade de transporte emitindo menos gases GEE (EPE,2012). Segundo o Balanço do Setor Metro ferroviário 2012/2013, houve um crescimento dos passageiros transportados sobre trilhos no Brasil, mas o crescimento da malha não acompanhou este aumento.

Para demostrar essa questão, dados publicados pelo Ministério de Minas e Energia, referentes à distribuição modal do transporte de passageiros no Brasil, mostram que o modo por trilhos, entre trens urbanos e metrôs, representa somente 1,7% do total de passageiros transportados no Brasil, conforme mostrado na Figura 1.

[1] Entende-se por Economia Verde uma economia que leva em consideração a finitude dos recursos naturais e os serviços prestado pela natureza no processo de tomada de decisão do comportamento dos agentes econômicos (IPEA, 2012).

[2] O desenvolvimento sustentável é um modelo que concilia o crescimento econômico, inclusão social e a proteção ambiental. (IPEA, 2012).

Figura. 1 – Distribuição modal do transporte de passageiros. Um comparativo entre o Brasil e outros países (bilhões de passageiros/ km)



Fonte: MME – EPE (2012).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO TRANSPORTE

No que tange o transporte de passageiros, para Gonçalves et al. (2014) é sabido que as cidades brasileiras tiveram seu desenvolvimento urbano baseado no modo rodoviário. De um modo geral, pode-se afirmar que a qualidade de vida nessas cidades vem se deteriorando, provocando deseconomias em função dos congestionamentos, acidentes e impactos ambientais. Especialmente em regiões metropolitanas, tais problemas estão atualmente agravados, parte pela ausência de planejamento e coordenação intermodal dos gestores públicos, parte pela competição político-econômica entre os modos rodoviários e ferroviário nas soluções de transporte coletivo. Uma proposta de reestruturação do modelo atual deve incorporar conceitos que busquem articular os diferentes modos em um sistema único de transporte, visando a eficiência dos deslocamentos, a sustentabilidade das fontes de energia e recursos e a satisfação do usuário.

Para comprovar seu ponto de vista, Gonçalves et al. (2014) fez referência às boas práticas internacionais de desenvolvimento socioeconômico, tanto em regiões do mundo desenvolvido, como Estocolmo, quanto em regiões em acelerado desenvolvimento, como Singapura. No que se refere ao transporte urbano, essas cidades têm em comum a eficiência do sistema, que investe em técnicas de planejamento e coordenação intermodal, priorizando a conexão entre as regiões mais afastadas e subúrbios, a seus respectivos locais de trabalho, através de um sistema de transportes integrado, com prioridade do modal ferroviário.

Segundo o relatório do Balanço Energético Nacional - BEN (2012), o transporte rodoviário é responsável por 93% do consumo final de energia do setor de transportes, o que influência, diretamente, na quantidade de dióxido de carbono - CO2 emitido, e demonstra a ineficiência da matriz de transporte do Brasil, do ponto de vista ambiental. Assim, investir em outros modos de transporte, como o ferroviário, nos centros das grandes cidades e regiões metropolitanas traz, entre outros, ganhos na eficiência energética, visto que consome menos energia, ao mesmo tempo, em que produz menos poluentes e GEE na atmosfera.

As Tabelas 1 e 2 trazem respectivamente, dados referentes às emissões de poluentes locais[3] e de CO_2 por modo de transporte; e energia desprendida por modo, por quilômetro, para uma pessoa realizar um deslocamento qualquer.

Tabela 1 – Emissões de poluentes por modo de transporte em municípios com mais de 60.000 hab

Transporte	Emissões (milhões de toneladas/ano) em municípios com mais de 60.000 hab		
	Poluentes locais*	CO_2	Total
Coletivo	0,1	9,5	9,6
Individual Motorizado	1,5	16,3	17,8
Total	1,6	25,8	27,4

Fonte: adaptado pelo autor de Revista BNDES 60 anos – Perspectivas Setoriais (2015).

Segundo dados do IPEA (2012), o transporte motorizado, com base na queima de combustíveis fósseis, é responsável pela emissão de vários poluentes nocivos à saúde e que degradam o ambiente urbano, os chamados poluentes locais: monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos (HC), os materiais particulados, os óxidos de nitrogênio (NOx) e os óxidos de enxofre (SOx). Na Tabela 3 são descritos alguns efeitos nocivos à saúde da alta concentração destes poluentes na saúde.

Tabela 2 – Energia desprendida por pessoa por modo (kep/km).

Modo de Transporte	Energia necessária por pessoa, por modo em kep (kg equivalente de petróleo)		
	1 km	10 km	100 km
VLT (trilhos)	0,010	0,10	1,0
Metrô (trilhos)	0,021	0,21	2,1
Ônibus	0,026	0,26	2,6
Individual Motorizado	0,055	0,55	5,5

Fonte: adaptado pelo autor de Revista BNDES 60 anos – Perspectivas Setoriais (2015).

[3] Os poluentes locais afetam especificamente as áreas de abrangência da operação do transporte. São os gases CO_2, NO_2, SO_2, HC, MP. (DE CARVALHO, C. H. R., 2011).

Tabela 3 – Efeitos nocivos dos principais poluentes veiculares locais

Poluente	Impacto
CO	Atua no sangue reduzindo sua oxigenação, podendo causar morte após determinado período de exposição.
NOx	Formação de dióxido de nitrogênio e na formação do *smog* fotoquímico[4] e chuva ácida. É um precursor do ozônio.
HC	Combustíveis não queimados ou parcialmente queimados, formam o *smog* e compostos cancerígenos. É um precursor do ozônio.
MP	Pode penetrar nas defesas do organismo, atingir os alvéolos pulmonares e causar irritações, asma, bronquite e câncer de pulmão. Sujeira e degradação de imóveis próximos aos corredores de transporte.
SOx	Precursor do ozônio, formando a chuva ácida e degradando vegetação e imóveis, além de provocar uma série de problemas de saúde.

Fonte: adaptado pelo autor de (DE CARVALHO, C. H. R., 2011).

Nesse contexto, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), através de uma pesquisa realizada na capital paulista em 2007, concluiu que a concentração de gás Ozônio[5] na atmosfera é mais excessiva nos grandes centros urbanos, sendo esses os mais atingidos, no âmbito da poluição atmosférica. Esse gás é formado a partir de outros gases que são emitidos principalmente pelos veículos, os quais reagem quando na presença de luz solar e calor. A despeito disso, em cidades pouco industrializadas, o setor de transportes acaba por contribuir com quase a totalidade das emissões dos poluentes atmosféricos, o que corrobora com a necessidade de políticas que promovam a redução da emissão veicular.

Na opinião de Santos, R.T. et al., 2015, o transporte coletivo deve ser pensado como projeto estruturador do desenvolvimento urbano, fruto de estudos consistentes, consubstanciados em um planejamento de longo prazo, discutido com a sociedade, e avalizado pelas instâncias técnicas competentes. Para Marcio de Almeida D`Agosto (2015), não existe substituto para a energia, pode-se até substituir uma fonte por outra, mas a atividade de transporte sem o consumo de alguma forma de energia parece não ser possível. Assim, pensamentos como esses vêm persuadir para o desenvolvimento de metodologias que otimizem o transporte. A exemplo das cidades, as redes intermodais podem promover a substituição modal, atraindo, ao menos em parte, os usuários de automóveis para o transporte coletivo, o que promove a equalização da matriz de transporte, e consequentemente o uso eficiente dos recursos.

[4] Fenômeno fotoquímico caracterizado pela formação de uma espécie de neblina composta por poluição, vapor de água e outros compostos químicos. (DE CARVALHO, C. H. R., 2011).

[5] A concentração de ozônio na camada estratosférica é benéfica à humanidade, pois protege a incidência de raios ultravioleta prejudiciais à saúde. Ao contrário disso, a alta concentração de ozônio em altitudes mais baixas causa problemas respiratórios nos seres humanos (CETESP, 2007).

2.2. PESQUISA OPERACIONAL COMO INSTRUMENTO PARA MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

A Pesquisa Operacional, ou simplesmente PO (Operational Research – Inglaterra; Operations Research – Estados Unidos; Investigação Operacional – Portugal) surgiu durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945) para a solução de problemas de natureza logística, tática e de estratégia militar. O avanço da PO, ao longo dos anos, se fez com o aumento da velocidade de processamento e memória dos computadores, possibilitando a solução de problemas cada vez mais complexos (FÁVERO & BELFIORE, 2013).

Em termos gerais, pode-se dizer que, PO consiste na utilização de um método científico – modelos matemáticos, estatísticos e algoritmos computacionais – que auxiliam no processo de tomada de decisão (ARENALES et al., 2007).

Desde então, o uso de pesquisa operacional como apoio a tomada de decisão é largamente utilizado no âmbito do transporte. Neste artigo, a Pesquisa Operacional vem subsidiar o cálculo de eficiência energética em diferentes rotas (caminhos, trechos) de uma rede de transportes, a fim de contribuir para a tomada de decisão de qual caminho é mais eficiente. As referidas espécies do gênero Pesquisa Operacional, como os modelos, por exemplo, podem representar uma situação real que se pretende avaliar ou mesmo uma situação teórica, no sentido de se verificar uma alternativa planejada para o futuro.

Segundo Lisboa (2009), um modelo é a representação simplificada de um sistema real, podendo ser um projeto já existente ou um projeto futuro. No primeiro caso, pretende-se reproduzir o funcionamento do sistema real existente, de forma a aumentar a produtividade, enquanto no segundo o objetivo é definir a estrutura ideal do futuro sistema.

Lachtermacher (2009) conceitua modelo como um processo para tomada de decisões, o qual proporciona ao decisor a clareza, de definir seus objetivos. Além disso, esse autor explica que, a correta identificação e armazenamento das diferentes decisões que influenciam os objetivos, propicia a definição das principais variáveis envolvidas no processo de tomada de decisão e as próprias limitações do sistema.

Um modelo é composto por três elementos principais: as variáveis de decisão e parâmetros, a função objetivo e as restrições do modelo. O modelo aqui utilizado, foi o modelo de Programação em Redes, através do Problema de Transporte com Transbordo. Conceitualmente esse modelo é classificado na Pesquisa Operacional como Modelo Determinístico, no qual as variáveis envolvidas em sua formulação são constantes e conhecidas, resultante, assim, de uma única solução exata, podendo essa ser ótima ou não (FÁVERO & BELFIORE, 2013).

Os problemas de Programação em Redes são modelados por meio de uma estrutura chamada de grafos ou redes, que consiste em diversos nós, em que cada nó deve estar conectado a um ou mais arcos (ARENALES et al., 2007). Esse conceito no âmbito do transporte de passageiros ou de cargas pode ser analogamente entendido como o conjunto de centralidades ou facilidades (*facilities*), os nós, conectados por corredores de transporte (caminhos, rotas) ou (*corridors*), os arcos, que representam uma rede de transportes, o grafo ou rede.

Nesse contexto, o Problema de Transporte com Transbordo é um tipo de modelagem de programação em rede, onde se considera, para uma determinada demanda (produtos ou passageiros), nós de origem, nós intermediários de transbordo (*facilities*) e nós de destino, conectados por corredores de transporte (*corridors*), cujo objetivo é transportar àquela

demanda a um custo logístico[6] mínimo. Esses modelos podem ser resolvidos por programação linear, como o problema aqui proposto.

3. METODOLOGIA

A metodologia está baseada em referência bibliográfica e pesquisa operacional. As referências alimentaram os dados necessários para a elaboração do modelo, como dados de consumo de energia e de emissões de CO_2, por modo de transporte e por quilômetro. Ainda, trouxeram modelos de cálculo de eficiência energética já estudados para diferentes veículos. A Pesquisa Operacional subsidiou a construção do modelo, através da elaboração da rede de transporte, por meio de um Problema de Transporte com Transbordo.

Para a elaboração da rede, foram considerados arcos como sendo os corredores de deslocamento e nós como sendo os pontos de origem, integração modal (transbordo), e destino. O traçado da rede é teórico, pois dessa forma foi possível construir rotas alternativas considerando os diferentes modos, visto que o objetivo é estimar a eficiência energética nessa rede.

3.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O objetivo a ser aqui alcançado é estimar a eficiência energética para o deslocamento – origem e destino – de uma determinada demanda. O problema está inserido na questão: eficiência do transporte de passageiros de regiões metropolitanas às áreas centrais. Para isso, foi criado um modelo de rede de transporte que considera diferentes modos como ônibus, VLT e automóvel, para transporte da demanda.

O caminho proposto para a solução desse modelo foi:

1) *Criar o modelo de rede de transporte integrado através do problema de transporte com transbordo;*
2) *Atribuir para cada nó, a demanda a ser atendida (passageiros) e a distância de percurso (km);*
3) *Calcular para cada arco, o consumo de energia (kj/pass.km) e as emissões de CO_2 (gCO_2/pass.km)*
4) *Calcular o número de veículos para atender a demanda de acordo com a capacidade de transporte para cada modo.*

Os limitadores do modelo foram a falta de dados reais para uma rede de transporte intermodal integrado para cidades brasileiras, e consequentemente a localização dos pontos de transbordo. Assim, foi considerada uma rede teórica. Foram escolhidos como destino, o centro de uma cidade qualquer, como origem três localidades da região metropolitana dessa cidade e, como transbordo pontos hipotéticos. Foram também atribuídos valores teóricos de demanda de passageiros aos nós de origem e transbordo.

Para não induzir os resultados, os pontos de transbordo foram dispostos no mesmo local, não gerando distancias diferentes entre as conexões, visto que, o objetivo aqui, é verificar as eficiências energéticas de cada percurso, chegando-se na mais eficiente.

[6] Custo logístico será aqui entendido como o menor custo, ou custo ótimo, ou custo de maior eficiência para se transportar uma demanda específica de uma origem a um destino, passando por pontos de transbordo.

3.2. LEVANTAMENTO DOS DADOS

Nessa etapa de construção do modelo, foram levantados dados reais (Tabela 4), no que cabe ao consumo de energia, emissão de CO_2 e capacidade de transporte; e dados teóricos (Tabela 5) no que cabe a demanda e aos locais de transbordo.

A Figura 2 apresenta a rede teórica de transporte intermodal criada para a aplicação neste estudo.

De acordo com D`Agosto (2015), existem vários conceitos para a eficiência energética. Será considerado nesse artigo o definido pelo IEA (2012), como sendo o nível de energia consumida para realizar determinado serviço. Assim, para ser mais eficiente, pode-se usar menos energia para o mesmo serviço e, ou ainda, realizar mais serviço mantendo o mesmo padrão de utilização de energia. Analogamente ao setor de transportes, esse conceito pode ser entendido como: aumentar a quantidade transportada (carga ou passageiro) e, ou a distância de transporte, sem aumentar a energia. Ou ainda, mantendo-se o mesmo trabalho de transporte, reduzir a energia consumida para realizá-lo (GUIMARÃES, V. de A.; D`AGOSTO, M. et al., 2014).

Tabela 4 – Dados reais

Modo de Transporte	Emissões CO_2 (gCO_2 /pass.km)[7]	Energia média consumida[8] (kj/pass.km)	Capacidade de Transporte[9] (pass/veículo)
Ônibus Convencional com MCI* traseiro a diesel	16	266	80
Automóvel compacto com MCI gasolina	127	2.766	1,3
VLT	2	183	225

* MCI = motor de combustão.

Fonte: adaptado pelo autor através de dados obtidos em DE ANDRADE, C. E. S. (2014); BITTENCOUT, I. A. (2014); Revista BNDES 60 anos – Perspectivas Setoriais (2015); D`AGOSTO (2015).

[7] DE ANDRADE, C. E. S. (2014); BITTENCOUT, I. A. (2014)

[8] Energia necessária por pessoa, por modo em kj. Adaptado de Revista BNDES 60 anos – Perspectivas Setoriais (2015).

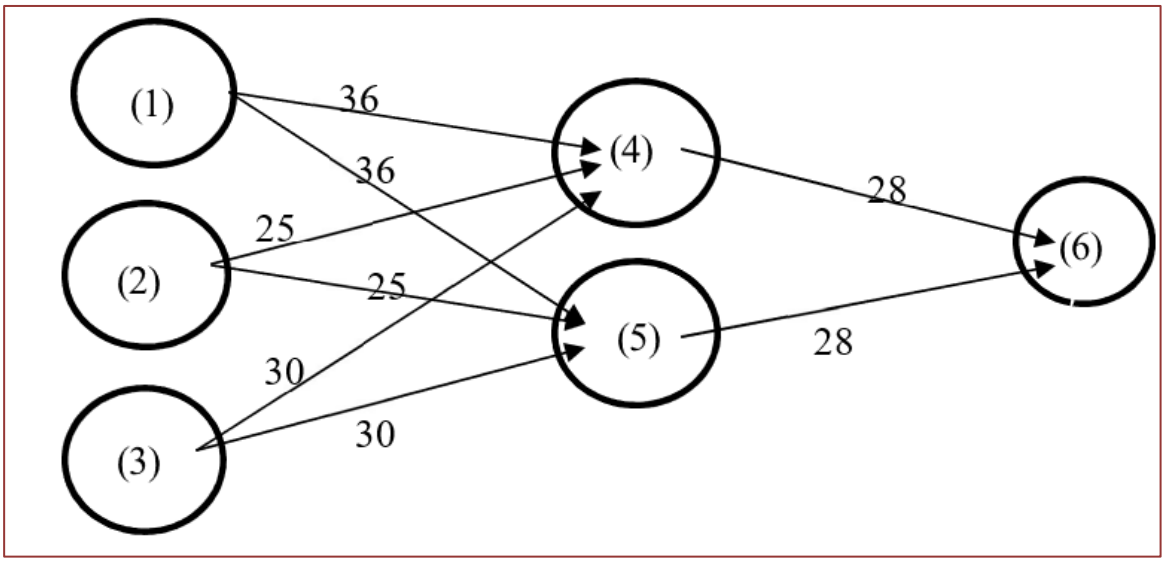
[9] D`AGOSTO (2015).

Tabela 5 – Dados teóricos

Pontos de Origem	Demanda (pass)	Distancia (km)	Ponto Transbordo (VLT)	Ponto Transbordo (Ônibus)	Distancia (km)	Ponto de Destino
(1)	180	36	(4)	(5)	28	(6)
(2)	250	25	(4)	(5)	28	(6)
(3)	200	30	(4)	(5)	28	(6)

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura. 2 – Rede Teórica de Transporte Intermodal Integrado



Fonte: elaborado pelo autor.

3.3. CÁLCULO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Esta pesquisa considera para o cálculo da eficiência energética (E) o consumo de CO_2 desprendido para realizar determinado trabalho em uma determinada distancia (c_{ij} em kj/ pass. km) e a quantidade em gCO_2 de emissões que esse trabalho gera para a atmosfera (e_{ij} em gCO_2/ pass. km). Assim tem-se:

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} E_{ij} = c_{ij} + e_{ij} \qquad (1)$$

Pela dificuldade aqui encontrada em equivaler entre as respectivas unidades de c_{ij} e e_{ij}, foi atribuída para E_{ij} o termo u.e. (unidades de energia).

3.4. VARIÁVEIS DE DECISÃO

As variáveis de decisão foram definidas a partir da quantidade de passageiros transportados para cada itinerário. Assim tem-se:

$x_{ij,k}$ = quantidade de passageiros transportados da origem i até o ponto de transbordo k. i = 1, 2, 3 e k = 4, 5.

x_{kj} = quantidade de passageiros transportados do ponto de transbordo k até o destino j. k = 4,5 e j = 6.

Assim, tem-se:

x_{14} = passageiros transportados entre a origem 1 e o ponto de transbordo 4;

x_{15} = passageiros transportados entre a origem 1 e o ponto de transbordo 5;

x_{24} = passageiros transportados entre a origem 2 e o ponto de transbordo 4;

x_{25} = passageiros transportados entre a origem 2 e o ponto de transbordo 5;

x_{34} = passageiros transportados entre a origem 3 e o ponto de transbordo 4;

x_{35} = passageiros transportados entre a origem 3 e o ponto de transbordo 5;

x_{46} = passageiros transportados entre o ponto de transbordo 4 e o destino final 6;

x_{56} = passageiros transportados entre o ponto de transbordo 5 e o destino final 6.

3.5. PARÂMETROS

Eij,k = eficiência energética da origem i ao destino j passando pelo ponto de transbordo k. Com i = 1, 2, 3; j = 6 e k = 4, 5.

c_{ik} = consumo de energia para o transporte da origem i até o ponto de transbordo k. i = 1, 2, 3 e k = 4, 5.

c_{kj} = consumo de energia para o transporte do ponto de transbordo k até o destino j. k = 4, 5 e j = 6. e_{ik} = emissão de CO_2 para o transporte da origem i até o ponto de transbordo k. i = 1, 2, 3 e k = 4, 5.

e_{kj} = emissão de CO_2 para o transporte do ponto de transbordo k até o destino j. k = 4, 5 e j = 6.

Ct_i = capacidade de transporte da origem i. i = 1, 2, 3.

d_j = demanda esperada no destino j. j = 6.

L_{ik} = deslocamento em km (quilômetros) da origem i ao ponto de transbordo k. i = 1, 2, 3 e k = 4, 5.

L_{jk} = deslocamento em km (quilômetros) do ponto de transbordo k ao destino final j. k = 4,5 e j = 6.

Os deslocamentos entre os pontos de origem 1, 2 e 3 e os pontos de transbordo 4 e 5 são feitos por modo rodoviário, ônibus convencional com motor de combustão interna a diesel e capacidade para 80 passageiros. Assim como, os deslocamentos entre o ponto de transbordo 5 e o destino final 6. O deslocamento entre o ponto de transbordo 5 e o ponto final 6 é feito por veículo leve sobre trilhos (VLT) com capacidade para 225 passageiros.

3.6. FUNÇÃO OBJETIVO

$$\min Z = \sum_{i=1}^{3}\sum_{k=4}^{5}(c_{i\,k} + e_{i\,k}) + \sum_{k=4}^{5}(c_{k\,6} + e_{k\,6}) \qquad (2)$$

Em que:

$$c_{i\,k} = (c_{ik} * x_{ik} * L_{ik}) \; com \; i = 1, 2, 3 \; ; k = 4, 5;$$

$$e_{i\,k} = (e_{ik} * x_{ik} * L_{ik}) \; com \; i = 1, 2, 3 \; ; k = 4, 5;$$

$$c_{k\,j} = (c_{kj} * x_{kj} * L_{kj}) \; com \; k = 4, 5 \; e \; j = 6;$$

$$e_{k\,j} = (e_{kj} * x_{kj} * L_{kj}) \; com \; k = 4, 5 \; e \; j = 6.$$

3.7. RESTRIÇÕES

1. A capacidade de transporte na origem deve ser respeitada:

$$\sum_{i=1}^{3}(x_{i\,k}) = C_{ti} \qquad com \; k = 4, 5$$

2. Toda a demanda do ponto final deve ser atendida:

$$\sum_{i=1}^{3}(x_{i\,k}) + \sum_{k=4}^{5}(x_{k\,6}) = d_j \qquad com \; k = 4, 5 \; e \; j = 6.$$

3. Conservação dos fluxos de entrada e saída:

$$\sum_{i=1}^{3}(x_{i\,k}) = \sum_{k=4}^{5}(x_{k\,6}) \qquad com \; k = 4, 5 \; e \; j = 6.$$

4. Respeitar a não negatividade de todas as variáveis de decisão:

$$x_{ik}, x_{kj} \geq 0, \; i = 1, 2, 3 \; ; k = 4, 5 \; e \; j = 6.$$

4. RESULTADOS

Utilizando a função Solver do programa Exel (Microsoft, 2014) para solucionar o problema, e os dados fornecidos nas Tabelas 4 e 5, foi calculada a eficiência energética para cada rota, calculando-se as emissões de CO_2 (gCO_2/pass.km) e o consumo de energia (kj/pass.km) como mostrado na Tabela 6:

Tabela 6 – Cálculo das emissões de CO_2 e do consumo de energia para cada rota

Cálculo da Eficiência Energética por trecho: (calculados através dos dados das Tabelas 4 e 5)							
Cálculo de emissões de CO_2 (gCO_2/pass.km)				Cálculo do consumo de energia (kj/pass.km)			
Transbordo	x4	x5	x6	Transbordo	x4	x5	x6
x1	576	576	0	x1	9.576	9.576	0
x2	400	400	0	x2	6.650	6.650	0
x3	480	480	0	x3	7.980	7.980	0
Ponto Final	x4	x5	x6	Ponto Final	x4	x5	x6
x4	0	0	56	x4	0	0	5.124
x5	0	0	448	x5	0	0	7.448

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Função Objetivo (2) foi calculada através da função SOMARPRODUTO do exel, em que, as matrizes das variáveis de decisão foram multiplicadas pelas respectivas matrizes de consumo de energia e emissões de CO_2 , respeitando as propriedades de multiplicação de matrizes.

Os resultados obtidos foram: $x_{14} = 180$; $x_{15} = 0$; $x_{24} = 250$; $x_{25} = 0$; $x_{34} = 200$; $x_{35} = 0$; $x_{46} = 630$; $x_{56} = 0$. Em que toda a capacidade nos PO (1,2,3) destinou-se ao PT (4) e desse para o PF (6), resultando os valores ótimos de 5.949.300 kj de energia desprendida e 198.960 gCO_2 emitidos na atmosfera, considerando toda a demanda de 630 passageiros, com ótima eficiência energética. O Relatório de sensibilidade mostrou que para cada passageiro cuja rota fosse alterada, o Reduzido Custo (*reduce cost*) seria de *392 gCO_2* e 2.324 kj, totalizando um custo de eficiência energética de 2.716 u.e. (unidade de energia).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De um modo geral pôde-se concluir que, investimentos no transporte urbano sobre trilhos, se devidamente planejados e gerenciados, são favoráveis ao deslocamento mais sustentável de passageiros. Na questão da eficiência energética, a rede intermodal aqui simulada mostrou que a integração entre os modos rodoviário, por ônibus, e ferroviário, por VLT, podem ser vistos como soluções mais eficientes quanto ao consumo de energia. O modo rodoviário sendo o alimentador de modos de maior capacidade, como o VLT, os quais podem ser alocados de modo a fazer os deslocamentos mais longos, por exemplo.

Tendo outro parâmetro aqui também apresentado, a capacidade dos veículos, e considerando, por exemplo, a substituição modal do transporte individual motorizado para o VLT, pelos dados aqui apresentados (Tabelas 2 e 4), em um percurso de 28 km, estima-se a redução de 504 quilograma equivalente de petróleo (kep) no consumo de energia para o transporte, além da redução aproximada de 307 carros nesse mesmo percurso (considerando 1,0 kep para cada quilômetro (km) percorrido, e a substituição modal do automóvel compacto (1,3 passageiros por veículo) para o VLT (400 passageiros para os 7 módulos do trem). Se essa tendência se confirmar em outras 10 capitais do Brasil, por exemplo, multiplicaríamos por dez a economia de energia.

Quanto a metodologia, considera-se satisfatória e pertinente para problemas como este simulado nessa pesquisa – cálculo da eficiência energética no transporte intermodal, podendo, inclusive, ser utilizado para redes maiores e reais.

Como dificuldades, cabe ressaltar, o fato de não se ter encontrado uma equivalência nas unidades consideradas para as parcelas que compuseram a equação de Eficiência Energética, fazendo com que o resultado obtido seja a soma de parcelas de unidades diferentes. Assim, foram também calculadas, pela mesma modelagem do Solver, as parcelas isoladamente, através da separação dessas parcelas na função objetivo (FO-1 kj + FO-2 gCO_2), para análise individual dos resultados.

Como continuidade a essa pesquisa, pretende-se aprofundar os conceitos sobre eficiência energética em transportes, indicadores, metodologias desenvolvidas, e principalmente, encontrar uma alternativa (método) para converter os consumos de energia e emissões de CO_2, em custo financeiro (R$), a fim direcionar as receitas obtidas dessas economias energéticas, em investimentos para o setor. Com esse propósito, já está em desenvolvimento uma contribuição metodológica para o planejamento de transporte sustentável aplicado a uma rede urbana de transportes de passageiros (MPTS-URB).

REFERÊNCIAS

[1] Arenales, M.; Armentano, V.; Morabito, R.; Yanasse, H. Pesquisa Operacional. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2007.

[2] Associação Nacional dos Transportes de Passageiro sobre Trilhos. Anuário metroferroviário 2013-2014, Brasilia.

[3] Bortolazzo, S. A. O VLT como alternativa de transporte urbano sustentável. Especialização em Gestão estratégica do Território Urbano. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, Porto Alegre, 2012.

[4] Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Relatório Anual de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo – 2007. São Paulo, 2007.

[5] D`Agosto, M. A. Transporte, uso de energia e impactos ambientais: uma abordagem introdutória – 1.ed. – Rio de Janeiro. Elsevier, 2015.

[6] De Andrade, C. E. S.; Bittencourt, I. A. Emissões de CO2 em Sistemas Metroviários: abordagem da energia de tração dos trens. ANPET (2014)

[7] Fleury, P.; Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável. Logística no Brasil: situação atual e transição para uma economia verde. Rio de Janeiro: FBDS, 2012. 43 p. (Coleção de estudos sobre diretrizes para uma economia verde no Brasil).

[8] Gonçalves, J. A. M., Portugal, L. da Silva, Nassi, Carlos D. A revitalização do sistema de trens de passageiros do Rio de Janeiro com base em dois sistemas ferroviários bemsucedidos. II Rio de Transportes, RJ, 2004.

[9] Gonçalves, J. A. M., Portugal, L. da Silva, Nassi, Carlos D. Proposta metodológica de apoio a tomada de decisões em um processo de revitalização de sistemas de trens metropolitanos. XII Rio de Transportes, RJ, 2015.

[10] Herdy, R. R.; Malburg, C. H. R.; Santos, R. T. Transporte urbano: O papel do BNDES no apoio à solução dos principais gargalos de mobilidade. In: BNDES 60 anos: perspectivas setoriais. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2012. p. 310-346.

[11] IEA (2012) Key World Energy Statistics 2012.

[12] Ministério de Minas e Energia - Empresa de Pesquisa Energética. A matriz de transporte e o desenvolvimento sustentável. São Paulo, 2012.

[13] Ministério dos Transportes, Banco de informações e mapas de transportes – BIT, Brasília:

Secretaria de Política Nacional de Transportes (SPNT) [citado em 2015 Ago 11]. Disponível em: http://www2.transportes.gov.br/bit/03-ferro/ferro.html

[14] Souza, C. G. Gargalos a serem superados. Anuário metro ferroviário 2013-2014, Brasília, p. 23-25, 2013/2014.

[15] Supervia. Seminário BNDES, Rio de Janeiro, 2005.

[16] Valente, A.M.: Passaglia, E.; Novaes, A.G. Gerenciamento de Transporte e Frotas. 2ª ed. rev. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

[17] UNEP - United Nations Environment Programme, 2011, Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication.

Capítulo 10

Robótica colaborativa: a contribuição das máquinas para uma nova revolução industrial

Everton Ruggeri Silva Araújo
Eduarda Caldas dos Prazeres
Rodrigo Rafael Campos da Silva de Souza
Aline Patricia Monteiro Lino

Resumo: Ao longo do desenvolver das eras das indústrias com crescimento significativo datadas a partir da terceira revolução nos anos 50, observou-se que a automação teve um impacto considerável na melhoria dos processos produtivos, com a competitividade dos sistemas de produção sendo fortemente ligada à aspectos de flexibilidade, confiabilidade, escalabilidade e, na maioria das vezes, relacionada também com sua disposição para a reconfiguração destes sistemas. Entretanto a percepção que esta revolução trouxe para a sociedade foi que os robôs iriam substituir os seres humanos. Com a contribuição da quarta revolução industrial e sistemas de manufatura inteligentes esta percepção vem gradativamente alterando trazendo como perspectivas a colaboração ao invés da substituição da mão de obra humana. Desta forma, este artigo trata de uma revisão bibliográfica narrativa a respeito da utilização da robótica colaborativa nos setores industriais, mineração e agrícola no Brasil como contribuinte para o surgimento de uma nova revolução industrial denominada indústria 5.0 onde os robôs colaborativos, podem trabalhar ao lado dos humanos de forma segura e colaborativa, com instalações simples e rápidas, ideais para atividades insalubres e operacões repetitivas com o intuito de contribuição para um mercado mais produtivo, eficiente, inteligente e ergonômico para a qualidade de vida dos operadores. Foi apresentado 3 cases do uso de robôs colaborativos e duas aplicações no setor de mineração, além disso se discutiu o cenário atual mundial que converge para este tópico, características fundamentais da robótica colaborativa nos métodos de produção e as principais aplicações deste segmento no país e o que pode vir no futuro.

Palavras-Chave: Robótica colaborativa, Revolução industrial, indústria 5.0, Mineração, setor agrícola.

1. INTRODUÇÃO

A utilização dos recursos da quarta revolução industrial tais como internet das coisas, manufatura aditiva, BigData, realidade aumentada, simulação computacional e outros é um procedimento recorrente quando se objetiva a melhoria de processos, potencialização dos processos produtivos e eficiência em diversos sistemas. Segundo a FIESP, apenas 41% das empresas de ramos industriais no Brasil utilizam o lean manufacturing e investem em P&D que são precursores para implementação de pilares da indústria 4.0. Contudo, mesmo considerando o elevado desenvolvimento observado nesta área, ainda não há comprovações contundentes de que estes pilares tenham sido implementados com eficiência no Brasil e tenha suplantado qualquer indício de trabalho manual na indústria.

Destarte, os recursos marcantes da indústria 4.0, começam a tomar uma nova forma no mundo com o que se denomina a próxima revolução industrial ou indústria 5.0 que associa a política verde aos parques industriais, potencializando tecnologias para eficiência energética, além de sistemas cyber-físico cognitivos à todas as atribuições gerenciais do ser humano, com este contribuindo e sendo o centro das ações de inovações em virtude da interação Homem- máquina individualizada com a cooperação das máquinas nas atividades industriais.

A partir deste cenário se obtém processos colaborativos com altos índices efetividade entre pessoas e máquinas como requisito primordial para se incrementar os processos de produção. A extração do máximo as qualidades técnicas dos indivíduos e, concomitantemente, tirar proveito das vantagens oferecidas pelo desenvolvimento tecnológico da automação, a influência mútua entre estes necessita ser pesquisada, desenvolvida e bem arquitetada. A chave do sucesso em relação a essa questão passa por estabelecer atividades mistas, promovendo a associação de operações manuais e automatizadas em modos de produção semi-automáticos que instiguem o trabalho colaborativo entre estes diferentes recursos (Daemon, 2017). Além de claro possuir a colaboração e incentivo de agentes públicos que fomentem programas e pacotes econômicos que potencializaem este segmento.

Conforme observado por Barata e Kayser (2023), os três principais países com maior prevalência em pesquisas sobre a indústria 5.0 são Índia, China e Estados Unidos da América, seguidos por alguns países europeus, como Itália, Espanha e Reino Unido. Assim observa-se a predominância de nações altamente industrializadas e com a necessidade de avanço na economia de transição que através da pesquisa e desenvolvimento caminham para introduzir uma nova revolução industrial.

Breque et. al. (2021) afirmam que uma nova sociedade ou Sociedade 5.0 está em desenvolvimento assim, tais autores citam que esta é uma sociedade na qual tecnologias avançadas de TI, Internet das coisas, robôs, inteligência artificial e realidade aumentada são ativamente usadas na vida cotidiana, na indústria, na saúde e em outras esferas de atividade, não principalmente para obter vantagens econômicas, mas para benefício e conveniência de cada cidadão. Neste contexto os robôs colaborativos surgem para aprimorar cada vez mais esta sociedade.

Os robôs colaborativos estão sendo reconhecidos pelas destacadas alterações no mercado e por conceber diversas novas possibilidades de utilização da automação em decorrência de suas características inovadoras. Por meio da robótica colaborativa, o homem e o robô conseguem desenvolver atividades notadamente mais sensíveis. Grades de proteção são eliminadas, novos postos de trabalho são criados, proporcionando

maior rentabilidade e máxima eficiência nas empresas serão potencializadas nesta próxima revolução industrial, a 5.0. A aceitação da tecnologia e a confiança nas tecnologias são cruciais. Isso resulta no aceite por parte da sociedade e de gestores de empresas no que tange aos benefícios que elas proporcionam. Portanto, de acordo com Muller (2020) as iniciativas para alcançar esta nova revolução deve evidenciar o apoio ao ser humano, mantendo o direito da sociedade participar na idealização e aplicação das tecnologias com suas respectivas finalidades.

Segundo pesquisas, o mercado mundial de robôs colaborativos deve investir quase 12 bilhões de dólares até o ano de 2025. Sendo praticamente todo o capital presente, atualmente, no setor robótico hoje (Vitalli, 2017).

De acordo com Maddikunta et. al. (2021) uma das tendências é também a unificação da inteligência humana aos robôs com o intuito de fabricar produtos personalizados em massa, com custo mínimo e precisão máxima, proporcionando assim que as indústrias coordenem os processos de fabricação para implementar as necessidades dos clientes e as mudanças do mercado.

Desta forma, sua implantação em posto de trabalho acontece de modo substancialmente mais simples e rápido, se comparado com os processos realizados para instalação de estruturas robóticas industriais tradicionais. Estes, por outro lado, demandam a criação extensiva de normas e mecanismos de segurança para sua operação, isso requer maior complexidade no que compete a instalação, elevados gastos, além de maior espaço físico no chão de fábrica, desafios característicos que cada país terá de superar mas que emerge com os principais itens que a nova revolução industrial terá pela frente para sua consolidação na sociedade e no mercado.

2. ROBÓTICA COLABORATIVA: CONCEITOS E MERCADO

O desenvolvimento do trabalho colaborativo, inicialmente, foi utilizado em atividades como o deslocamento preciso de grandes cargas em operações de montagem, possibilitando o controle do movimento de um transmissor robótico diretamente por um colaborador que, desta forma, recebe informações do bom andamento do processo. Os impeditivos virtuais vieram contribuir com o controle livre nos sistemas colaborativos e possibilitaram que se desenvolvessem atividades cansativas e que demandavam alto grau de exatidão a partir do estabelecimento de regras relacionadas ao movimento realizado pelo operador.

A automatização e sua ressonância sobre a criação do emprego sempre foi uma preocupação para grande parte dos indivíduos e passou a ser discutida com maior ênfase no Brasil nos últimos tempos. Os robôs colaborativos foram criados para serem manuseados sem grandes complicaçõespor pessoas não especialistas em robótica, ou seja, a partir de comandos intuitivos podem ser empregados nas mais diferentes funções e apresentando baixo risco de acidentes.

Em virtude disto utiliza-se tais componentes em linhas de montagem de equipamentos de pequenas dimensões, como eletrônicos e componentes embarcados, que possam olaborar no controle da qualidade de produtos produzidos e atividades manualmente.

Os robôs colaborativos são instrumentalizados com sistemas inteligentes a partir de transdutores que detectam a aproximação, antecipando-se desta forma, de uma acidental colisão, diminuindo a velocidade de deslocamento ou parando completamente ao chegar a

uma distância mínima do trabalhador ou elemento que se apresente como risco de colisão. Exibem design apropriado com normas de segurança, são flexíveis e possibilitam programação teach-in a partir de orientação manual do percurso de deslocamento e das demais funções acessórias (Vitalli, 2017).

Outro ponto que deve ser exposto é que praticamente não há diminuição na velocidade de produção, pois são os robôs colaborativos que realizam as atividades e que não estão mais sujeitos ao esgotamento físico dos trabalhadores diretamente ligados à atividade em si. Destarte tais robôs ainda podem colaborar com redução de riscos ergonômicos em trabalhadores que utilizam os mesmos além da redução de acidentes de trabalho e potencialização de processos como na aplicação em centros cirúrgicos, pois este tipo de sistema permite guiar o movimento da mão até ao local determinado enquanto minimiza possíveis erros humanos durante determinada operação (Ribeiro, 2010).

A robótica tem ampliado seu campo de atuação, tornando-se, gradativamente, mais presente nos processos manufaturados em todos os setores de mercado, haja vista que diminui os gastos relacionados com o trabalho e problemas ligados à utilização de recursos humanos em ambientes perigosos ou insalubres. A utilização da automação e robótica pode ser aplicada junto à simples operações de transporte até robôs multieixos com sistemas avançados de visão integrada e flexibilidade de reconfiguração em tempo real (Golnabia e Asadpourb, 2007).

A tecnologia no que tange a colaboração está intimamente relacionada com a visão computacional, processamento de imagens, IA e aferição quanto à padrões dentro de um ambiente. Este ramo da engenharia de sistemas vem também sendo empregado, em processos de supervisão de qualidade, para se ter o controle de máquinas em processos manufaturados. Em linhas gerais, as funções que se esperam de uma visão de máquina são a exploração e a imposição das restrições de uma cena, obtenção de imagens, avaliação das imagens capturadas, inspeção de objetos e de suas especificidades e desenvolvimento de ações imediatas com o intuito de discriminar os objetos correspondentes, funções basilares para a automação da costura industrial (Book et. al. , 2010).

A partir do suporte de novos materiais e de máquinas reprogramáveis, os níveis de produção apresentaram índices cada vez mais elevados, sendo fundamentais para suprir as demandas cada vez mais acentuadas da sociedade (Bruno, 2016). Tais ações, além de possibilitarem maior vantagem competitiva, serão determinantes para agregar mais valor ao produto, consequentemente, maior reconhecimento por parte do consumidor, integrado, do mesmo modo, às novas tecnologias. A reorganização com a utilização de robôs colaborativos irá ser determinante para a transformação de toda a cadeia produtiva (Foresight, 2013).

Por fim, de acordo com Vitalli (2017) a utilização dos robôs colaborativos permite criar uma linha de mercadorias diversificadas e mais flexíveis, onde há pouca necessidade de conformidade eletromecânica e maximiza as linhas produtivas das empresas.

2.1. A IMPORTÂNCIA DOS SISTEMAS COLABORATIVOS

Um conjunto de trabalho coordenado, ou, em outras palavras, um determinado sistema pode ser classificado como colaborativo se nele for possível identificar uma comunicação simultânea entre o agente operador e a máquina robótica durante a realização de uma atividade (Wannasuphoprasit et. al., 2001).

Essa relação interativa entre o agente operador e o sistema, objetivam multiplicar as movimentações motoras do operador. A palavra 'colaborativo', é a expressão utilizada para dar referência aos sistemas robóticos, que possibilitam a diferenciação existente entre dois modelos: a telemanipulação e a manipulação colaborativa. No que se diz respeito à telemanipulação, é a presença de uma relação indireta entre o agente operador e o sistema robótico nos quais integram- se mutuamente. Neste ponto, o agente operador do sistema estabelece uma relação direta com um robô de comando central, que permite manipular um ou vários robôs remotamente, que interconectados, serão os responsáveis pela realização do trabalho. Entretanto, nestes casos, justamente pela ausência do operador no mesmo espaço físico de trabalho, são necessárias a utilização de meios que permitam ter percepções táteis e orientações visuais (Marayong, 2007).

No âmbito da manipulação colaborativa o agente operador, está presente em pessoa no espaço onde se realiza o trabalho e comanda prontamente o sistema robótico. Nesta inter- relação o robô repete sequencialmente tudo o que o agente operador presencialmente comanda. Com isso, o operador sustenta a capacidade em manter a movimentação sobre o espaço físico e o mecanismo terminal do robô, não se fazendo necessários quaisquer outros instrumentos (Emeagwali, 2004).

É imprescindível ter em mente a devida diferenciação entre estes sistemas e os sistemas colaborativos robóticos, que indicam uma colaboração entre dois ou mais robôs.

Os sistemas colaborativos avançaram muito no aspecto suplementar aos sistemas robóticos dos setores industriais nos quais, por motivos de segurança do trabalho, não poderiam proceder conjuntamente com pessoas, dado o nivel de perigo e/ou risco que essas atividades apresentam.

Ao manejar diretamente o robô dentro do espaço de operações o agente condiciona a sua capacidade cinestésica, isto é, sua percepção de movimentação, deixando os manipuladores colaborativos mais harmônicos e sensíveis ao utilizá-los do que pelos sistemas de telemanipulação (Ribeiro, 2010).

No entanto, a prática operacional na atuação direta do mecanismo, eleva a dificuldade no seu controle, pois os movimentos mecânicos repetidos do operador, de maneira geral, são difíceis de prever e podem influenciar drásticamente na resposta do sistema. Além do mais, acrescentando a essa situação, a movimentação da mão humana também pode apresentar os seus próprios modelos cinéticos, isto é, de movimentos realizados sob a influência das forças sobre o movimento dos corpos, o que poderia provavelmente resultar em movimentos não pensados ou inconscientes (Wannasuphoprasit et. al, 2001). Este conjunto de itens deve caminhar junto ao controle de servomecanimos com técnicas apuradas de respostas dos manipuladores industriais e influenciam diretamente este segmento.

2.2. INFLUÊNCIAS DA ROBÓTICA COLABORATIVA NO SETOR INDUSTRIAL

Uma das técnicas adotadas para amplificar em escala exponencial a produção de componentes do setor industrial é a robótica colaborativa.

No decorrer dos últimos anos, muitos progressos tecnológicos foram implementados no setor. Um dos principais fatores que impulsionaram essa mudança é o da velocidade operacional dos robôs que superaram e muito a dos humanos na maior parte das ações produtivas, além disso, estão executando outras habilidades mais sofisticadas. Há ainda

o fato de que podem fucionar ininterruptamente de maneira estável com o mínimo custo de reposição de peças e manutenção (Tanke et. al., 2011).

Esses robôs podem ser considerados ou classificados quanto a sua aplicação de construção, em dois grupos: robôs industriais e robôs não industriais.

Já no que diz repeito às suas finalidades, limitações, protótipos e formas, compõe outros dois tipos primários: Robô Fixo – popularmente conhecido como braço robótico, é formado basicamente por uma base fixa e por unidades de mecanismos e juntas que permitem executar diversos movimentos em várias direções, dependendo de como será utilizado, isto é, para qual função será construído. Por conta de sua grande utilização em aplicações industriais, acabou tornando-se o exemplo mais comum de robô; Robô Móvel – mais conhecido com veículo robótico, este tipo de máquina possui um leque de apresentação mais amplo. É importante destacar que os robôs industriais possuem um raio de movimentação mais restrito ao espaço dos seus operadores para a execução do trabalho, onde o sistema robótico poderá posicionar-se para usar o mecanismo. A robótica foi desenvolvida com diferentes objetivos, e não raras vezes, todos integrados ao mesmo tempo. Dentre eles, incluem-se a criação de controladores úteis para a execução de trabalhos de robôs do mundo real, exploração de detalhes, fenômenos psicológicos, dentre outros (Silveira, 2012).

A utilização de robôs que possuem a capacidade motora empregados nas atividades agrícolas autônomas possuem grandes potencialidades como ferramentas dotadas de tecnologia robótica voltadas para a agricultura de precisão, trazendo benefícios e vantagens, podendo fazer uso dos mais diversos ramos teórico- conceituais em controle robótico, já embasadas e solidificadas para tantas outras aplicações em diversos campos (Tangerino et. al., 2011).

A inclinação mais recente de criação e aperfeiçoamento robóticos de categoria móvel, bem como de outras composições autônomas para realizarem atividades mais peculiares é direcionada especialmente para obter melhores desempenhos e eficiência, originando alguns ganhos operacionais entre elas: (a redução de compactação do solo, a ausência de agente operador dentro da máquina) quando são comparados á capacidade de grandes máquinas (Blackmore e Griepentrong, 2006).

2.3. ROBÓTICA E TENDÊNCIAS NO SETOR DE MINERAÇÃO

A alta produtividade dos sistemas de mineração, transporte e manutenção é agora um indicador fundamental de competitividade no setor, desafiando a percepção tradicional de que a mineração é um setor imutável. De acordo com Ulewicz et. al. (2022), avanços tecnológicos estão desempenhando um papel significativo na transformação desse ramo da economia, resultando em melhorias notáveis em segurança, produtividade, sustentabilidade ambiental e eficiência no uso de recursos.

As tecnologias mais importantes do processo de transformação de minérios atualmente no Brasil são a automação e a robótica, a inteligência artificial, a Internet das coisas, os drones, os gêmeos digitais, a realidade virtual e o uso de escavações para armazenamento de energia. (Ulewicz et. al., 2022).

A automação embora seja um recurso de terceira revolução industrial não teve sua disseminação implementada com rapidez no país devido as desigualdades econôminas e ausência de planos de investimento ao segmento eficazes. O seu uso a partir desta nova

compreensão no setor não é mais de substituição da mão de obra humana e sim de colaboração e auxílio ao seu hurmano nas atividades desenvolvidas na mineração. Junto com a robótica as duas estão rapidamente se consolidando como fundamentais em diversas áreas, especificamente em locais de extração, como minas a céu aberto, a automação de equipamentos de perfuração e transporte de materiais não só resulta em um aumento notável na eficiência, mas também desempenha um papel crucial na redução do risco de acidentes, promovendo uma melhoria significativa na segurança dos trabalhadores. O uso de robôs não apenas minimiza a exposição humana em áreas de risco, mas também facilita a inspeção remota de ativos e a coleta de dados, possibilitando tomadas de decisão mais eficazes.

Portanto, a automação melhora a eficiência operacional e oferece controle remoto para eliminar a exposição dos trabalhadores a ambientes perigosos. (Skenderas & Politi, 2023).

A implementação da inteligência artificial (IA) nos processos de mineração, como indicado por Skenderas e Politi (2023), desempenha um papel crucial na otimização da cadeia de suprimentos. O processo de exploração, em particular, pode se beneficiar significativamente da eficiência aprimorada, graças à identificação e análise mais eficazes de locais e processos potenciais. A contribuição da IA também se destaca na manutenção preditiva, onde a tecnologia pode realizar uma variedade de cenários, detectando potenciais problemas e assegurando a segurança e a estabilidade do local.

Além disso, segundo os insights de Skenderas e Politi (2023), empresas mineradoras que incorporaram a IA em suas operações experimentaram melhorias notáveis. O rendimento de mineração registrou um aumento significativo, variando de 10 a 20%, refletindo a eficácia da IA na otimização dos processos de extração. A produtividade de aquisição também testemunhou uma ascensão notável, atingindo até 50%, indicando a influência positiva da IA na eficiência operacional e na tomada de decisões estratégicas. Esses avanços reforçam a ideia de que a inteligência artificial está se tornando uma aliada valiosa no setor de mineração, proporcionando ganhos substanciais em termos de desempenho e produtividade.

Diante das numerosas oportunidades de implementação no setor de mineração e dos benefícios inequívocos que as empresas obtiveram após a aplicação, é notável que a maioria das organizações que adotaram o uso colaborativo de robótica e inteligência artificial sejam internacionais. Essa observação evidencia uma lacuna percebida no avanço tecnológico do setor mineral brasileiro, indicando um certo atraso em relação a outras partes do mundo nesses campos específicos. Embora o Brasil seja uma potência no setor de mineração, há uma clara necessidade de intensificar os esforços e investimentos na incorporação dessas tecnologias inovadoras. A adoção mais ampla da robótica colaborativa e da inteligência artificial não apenas impulsionaria a eficiência e competitividade das operações, mas também reforçaria a posição do país como líder no cenário global da mineração. Essa consideração torna-se crucial à medida que a indústria busca continuamente aprimorar suas práticas, promovendo inovação, sustentabilidade e ganhos econômicos significativos.

Conforme destacado por Dias (2023), a Vale, empresa brasileira de destaque, emerge como líder nacional na implementação da inteligência artificial, apresentando mais de três casos bem-sucedidos. Um exemplo notável ocorreu no estado do Pará, na mina de Salobo, localizada no município de Marabá. Nesse cenário, a Vale aplicou inteligência artificial do tipo Advanced Analytics com o objetivo de otimizar o ciclo de vida dos equipamentos, aumentar sua durabilidade e evitar intervenções desnecessárias. Essa abordagem

resultou em uma economia significativa de US$ 5 milhões em apenas um ano, demonstrando os benefícios tangíveis da integração da inteligência artificial nos processos operacionais (Dias, 2023).

Observa-se que, no cenário internacional, diversas empresas têm colhido vantagens significativas ao adotar essas tecnologias inovadoras. Contudo, é imperativo destacar que, diante desses potenciais benefícios e das implementações bem-sucedidas por empresas como a Vale, retardar ou negligenciar a adoção dessas tecnologias no setor de mineração torna-se uma estratégia obsoleta. A rápida evolução tecnológica, quando aplicada de maneira estratégica, não apenas melhora a eficiência operacional, mas também fortalece a competitividade das empresas no cenário nacional e internacional.

2.4. ROBÓTICA E TENDÊNCIAS NO SETOR AGRÍCOLA

O agronegócio tem sido apresentado como o setor de maior contribuição para o Produto Interno Bruto (PIB) nacional e também o principal responsável por gerar superávit na balança comercial por ser o setor que mais exporta produtos alimentícios primários não manufaturados (Breitenbach, 2014). Segundo dados do Centro de Estudos Avançados em Economia (CEPEA), o setor do agronegócio é responsável por 21,4% do PIB nacional, aumentando aproximadamente 3,81% em relação ao ano anterior (CEPEA, 2020).

Este crescimento impulsionou o desenvolvimento e a comercialização de tecnologias agrícolas, tornando o agrosetor mais digital (Talaviya, Shah, Patel, Yagnik & Shah, 2020). Por essa via, o uso de ferramentas de inteligência artificial (IA) vem ganhando espaço e passando a desempenhar um papel importante na vida dos produtores rurais, ampliando suas percepções e ajudando-os a mudar o ambiente em que estão inseridos. A incorporação do uso dessas tecnologias melhora a compreensão dos dados coletados no campo e permite que as práticas agrícolas sejam projetadas de forma sistemática com o mínimo de trabalho manual (Subeesh & Mehta, 2021).

O setor agrícola, a partir do ano de 2030 – aproximadamente –, mesclará o modo mais tradicional com novíssimas gerações de robôs que deverão ser suficientemente capazes de executar trabalhos com o ambiente natural para que seja possível estabelecer um nível mínimo competitividade econômica e sustentável frente aos outros mercados produtores, com a oferta de alimentos de alta qualidade e em larga escala (Eurobotics, 2012).

Inamasu (2011) afirma que a pluridisciplinaridade e os progressos da tecnologia que passam a transformar e criar novas práticas agrícolas, poderão abrir outras oportunidades para a entrada de sistemas independentes nas lavouras. Esses, por seu turno, devem ser entendidos como mecanismos de suporte que irão compor e adcionar ao sistema de manuseio e não apenas como uma solução isolada e imediata.

A automação robotizada das atividades dos setores rural ou agrícola, devem levar em conta todos os elementos ligados a essa capacidade produtiva, permitindo a sua otimização em volume produtivo minimizando os seus impactos. O aproveitamento agrícola sustentável, leva em consideração uma adequação conjunta entre alguns vetores como, por exemplo: a situação econômica, que se materializa diretamente no lucro, indica que, se a agricultura não gerar dividendos ou rendimentos ao agricultor, ela acaba por ser inviável; há ainda, o fator social, pois se o trabalhador ou produtor não obtiver receitas, não haveria lógica, motivo ou razão na atividade rural; no tocante ao meio ambiente, que significa a preservação e o bom uso dos recursos naturais, para que seja possível a co-

existência da agricultura e meio ambiente saudável no futuro. Por isso, os três vetores à saber, econômicos, sociais e ambientais são o grande problema a serem enfrentados na atualidade que impõe as regulamentações da atividade no sentido de sustentabilidade. Diante disso, projetar um aumento da produtividade com sustentabilidade necessita da utilização de técnicas, métodos e instrumentos que, em grande parte, não estão adequadas à real necessidade (Hackenhaar et. al., 2015).

Nessa perspectiva, o setor agrícola deve ser conduzido para a criação e aperfeiçoamento de métodos mais eficazes, processos mais consistentes, sistemas mais modernos, sensores e equipamentos com maior capacidade funcional objetivando a perfeita integração dos mais variados sistemas de produtivos e que sejam sustentáveis (Crestana e Fragalle, 2012).

Os computadores e robôs devidamente integrados, supervisionam e monitoram todo o cuidadoso procedimento técnico no momento do plantio de mudas, assim como na fertilização do solo, a estabilidade, o tipo de corte da raiz, até o processo de embalagem e pesagem, tendo como resultado, um alto índice de produtos mais perfeitos, isto é, sem imperfeições, doenças ou danos causados por pragas e insetos nocivos àquela cultura. Vale lembrar que o nível de automação nas fábricas de planta é tão alto que, no decorrer de alguns anos, podem tornar- se instalações de produção absolutamente independentes e controladas à distância (Noguchi, 2010).

Os lavradores sentem a necessidade de obter mais informações sobre a cultura e o solo, assim como o seu estado geológico e agrotécnico antes e no decurso da estação de crescimento das plantas. Temos como exemplos: robôs batedores, que podem viajar para espaços e locais de difícil acesso, pré- programados, para extrair uma amostra do solo com o objetivo de identificar os níveis de umidade usando um aparelho chamado de penetrômetro de cone, que nada mais é do que uma espécie de sonda que é inserida na terra para mensurar a compactação, e por meio de uma sonda elétrica, medir o pH ou a acidez do solo (Grift, 2007.)

A continuidade do avanço tecnológico resultou em maior produtividade e rendimento econômico para as atividades relacionadas à agricultura, horticultura e silvicultura. É evidente que hoje, há uma direção bem definida que visa substituir as máquinas de grande porte, muito pesadas, por outras que contenham tecnologias criadas a partir de dados e informações que podem dispor de procedimentos e/ou atividades autonomamente viáveis e mais confiáveis em campo, com o apoio da robótica. (Hackenhaar et al., 2015).

Embora seja possível identificar o evidente aumento de produtividade que a implementação da tecnologia robótica colaborativa propiciou no setor industrial agrícola, é de suma importância ressaltar que, essa redução de gastos de produção também podem ocorrer por uma série de outras questões, pois a empresa que emprega mais integração de comunicação entre robôs e pessoas na sua linha de produção, reduz seus gastos com outras medidas de segurança, pois, para estes funcionários, não será mais preciso realizar tais atividades que anteriormente eram comuns (Fispal Tecnologia, 2018). Além disso, surge nesse segmento outro importante recurso que é o da inteligência artificial.

As tecnologias de IA devem ser cruciais para este setor, devido à incerteza que as rodeiam. A sociedade como um todo consegue cada vez mais utilizar estes recursos para auxílio de tarefas do dia-a-dia e é eminente sua utilização para Essas ferramentas ajudar os produtores rurais a entender por que estão ocorrendo fenômenos imprevistos, bem

como os orientar sobre quais cultivares devem ser plantadas e as melhores datas para realizar isto.

3. METODOLOGIA

No desenvolvimento dessa pesquisa utilizou-se o método da Revisão Bibliográfica Narrativa, uma revisão da literatura, a qual é uma análise ponderada e extensa da literatura disponível sobre um determinado assunto, utilizando livros, periódicos, jornais, artigos impressos e eletrônicos, de forma a reconhecer os autores que trataram sobre o tema anteriormente (Trentini e Paim, 1999).

O referencial teórico é essencial para fundamentar a proposta do estudo, assim como enriquecer a reflexão entre os autores mais relevantes no campo de pesquisa (Silva e Trentini, 2002).

Esta revisão é uma reflexão sobre o material já produzido por outros autores, mas que se desenrola de forma imparcial tendo por base o entendimento do pesquisadore sua própria interpretação, de acordo com os objetivos pré-estabelecidos.

No que concerne ao tipo de pesquisa, elegeu-se a pesquisa qualitativa, esta pode ser considerada um eficaz ponto de referência ao pesquisador, o qual é tratado como ponto principal de todo o processo em um estudo baseado na metodologia de Revisão Bibliográfica Narrativa – Revisão de Literatura (Cajueiro, 2012).

Nesse ínterim, um procedimento metodológico guiado pela pesquisa qualitativa, a análise das informações coletadas tem o intuito de apresentar conclusões importantes e conexas, com base em um problema de pesquisa específico (Marconi e Lakatos, 2017).

Assim, a metodologia de Revisão Bibliográfica Narrativa tem como principal objetivo o debate e a definição dos aspectos associados ao objeto de estudo, utilizando exclusivamente os conceitos observados em publicações de periódicos, livros, jornais, artigos, e demais meios de informação de grande relevância e impacto nomeio acadêmico (Lüdke e André, 2013).

A metodologia da Revisão Bibliográfica Narrativa tem a função de ser um trabalho amplo, delineadas para discutir o ‘estado da arte’ de um determinado assunto, sob uma perspectiva teórica ou contextual (Rother, 2007).

Segundo Rother (2007), os textos usados na revisão narrativa constituem uma análise crítica, podendo contribuir no debate de tem éticas e atualizar o conhecimento em um curto espaço de tempo.

De tal modo, a metodologia de Revisão Bibliográfica Narrativa adotada se mostra capaz de promover a devida discussão referente ao objeto de estudo definido no presente trabalho de pesquisa, buscando uma conclusão inovadora e o desenvolvimento de novos estudos (Marconi e Lakatos, 2017).

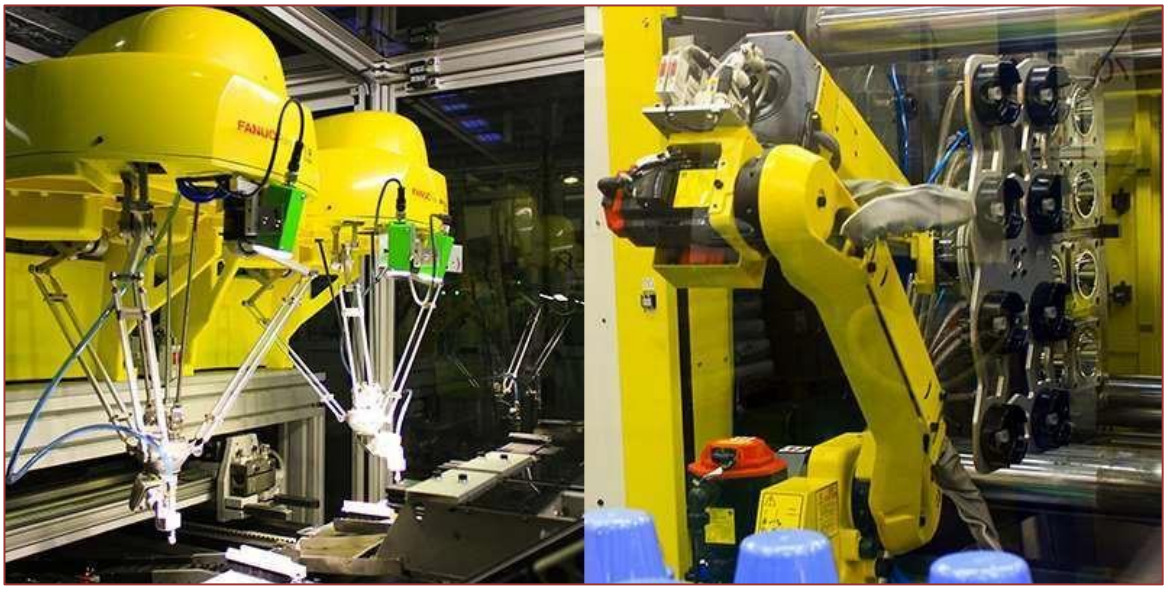
4. RESULTADOS

4.1. ROBÓTICA COLABORATIVA: EXMPLOS DE APLICAÇÃO NO PROCESSO PRODUTIVO INDUSTRIAL E NO SETOR DE MINERAÇÃO

O presente capítulo aborda vantagens da Robótica Colaborativa no processo produtivos de alguns setores do mercado. Por meio do caso 1, 2 e 3 e das Figuras 1, 2 e 3, verificam-se alguns casos práticos de soluções promovidas pela Robótica Colaborativa.

O caso 1 foi analisado em uma célula de moldagem por injeção na fabricação de produtos com o intuito de aumentar a produtividade e verificar o efeito da robótica colaborativa, a figura 1 apresenta o que foi aplicado neste caso.

Figura 1 – Utilização de robôs coloborativos em células de injeção para aumentar a produtividade

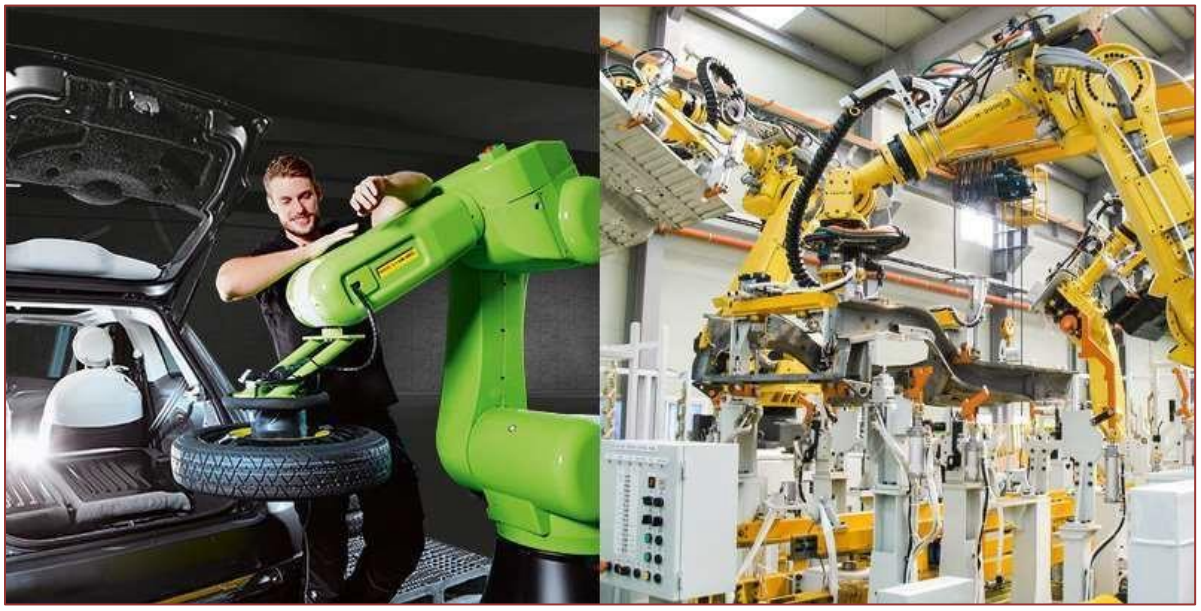


Fonte: Fanuc (2018a).

A tarefa do caso 1 consistiu em implementar uma solução robotizada para a montagem e adição de inserções em uma ampla variedade de peças moldadas por injeção híbridas de metal e plástico. A solução proposta envolveu a criação de uma célula utilizando os versáteis robôs FANUC M-1, operando tanto de forma independente quanto em combinação com os robôs Cartesianos. Equipados com a avançada tecnologia iRVision, esses robôs são capazes de reconhecer e posicionar as peças com níveis extremamente elevados de precisão. O resultado alcançado é um design de célula econômico e flexível, permitindo uma montagem e reconhecimento perfeitos de inserções. Isso não apenas aprimora a eficiência do processo, mas também proporciona uma maior competitividade para os clientes. Destaca-se que o robô FANUC M-1 oferece uma montagem altamente variável, podendo ser facilmente instalado em máquinas mais compactas, proporcionando ainda mais versatilidade à solução implementada.

O caso 2 foi direcionado à soluções promovidas pela Robótica Colaborativa com a utilização de robô colaborativo para movimento automatizado, sem barreiras de segurança e à velocidade máxima. A figura 2 ilustra este caso.

Figura 2 – Utilização de robô colaborativo para movimento automatizado, sem barreiras de segurança e à velocidade máxima



Fonte: Fanuc (2018b).

A tarefa do caso 2 visou impulsionar a evolução da abordagem "fábrica inteligente", visando a auto-organização dos processos de produção e da cadeia de abastecimento para atender de maneira ainda mais eficiente aos pedidos dos clientes.

Para alcançar esse objetivo, optou-se pela instalação de robôs especializados em soldadura e manuseamento, operando atrás de barreiras de segurança convencionais. Uma exceção notável é o robô CR-35iA da FANUC, que opera sem a necessidade de barreiras de segurança, atingindo sua velocidade máxima de 750 mm/s. Este robô realiza a tarefa de colocar a peça fabricada em uma estrutura de suporte.

O resultado alcançado foi da automação de tarefas simples, como o transporte de peças no ambiente de produção, por meio de sistemas automáticos. Essa evolução promete transformar os locais de trabalho em ambientes ergonômicos, silenciosos e livres de lesões físicas. O robô CR- 35iA, com sua capacidade de elevação e posicionamento de cargas de até 35 kg, equipado com sensores de força e segurança, destaca-se como a escolha ideal para realizar tarefas especializadas nesse contexto.

O caso 3 foi analisado em uma célula especial para manusear, orientar e processar componentes de moldagem para análise de efeito da robótica colaborativa, a figura 3 apresentao que foi aplicado neste caso.

Figura 3 – Utilização de célula especial para manusear, orientar e processar componentes

Fonte: Fanuc (2018c).

A tarefa em questão demandou a produção automatizada de montagens de cabines para a DAF, exigindo o manuseio automático de fundições pesadas ao longo de processos que incluem fresamento, furação, fundição e rebarbação, tudo sem intervenção humana. A solução proposta envolve a implementação dos robôs de manuseamento FANUC R-2000iB/165F, os quais são equipados com sistemas avançados de visão e laser. Essa combinação permite que os robôs visualizem, posicionem e orientem as fundições de maneira precisa, além de carregarem e descarregarem as peças ao longo das máquinas na célula. O emprego da visão e do laser não apenas assegura uma execução eficiente dos processos, mas também aumenta a flexibilidade da automação. Comentando sobre a aplicação dessa solução, destaca-se a notável capacidade dos robôs FANUC R-2000iB/165F em lidar com tarefas complexas de manuseamento, proporcionando uma integração eficaz nos processos de fabricação das cabines DAF.

Não obstante de todas essas soluções que vem sendo realizadas no setor de mineração pode-se citar a utilização de robôs colaborativos em dutos de mineração para inspecionar estes itens, foi o que foi realizado por Resende et.al. (2020) que utilizou o EspeleoRobô com câmera digital B06W-1080P-HX (SV3C, Longgang District) para detecção de possíveis falhas conforme apresentado na figura 4.

Figura 4 – Utilização de robô coloborativo em dutos de mineração

Fonte: Resende et. al. (2020).

Ao serem empregados em dutos de mineração, esses robôs podem realizar inspeções detalhadas de forma autônoma, alcançando áreas de difícil acesso e proporcionando uma análise precisa do estado dos dutos.

Essa abordagem não apenas otimiza os processos de manutenção, mas também contribui para a segurança dos trabalhadores, reduzindo a exposição a ambientes potencialmente perigosos. A introdução de robôs colaborativos na inspeção de dutos no setor de mineração exemplifica a convergência bem-sucedida entre tecnologia avançada e as demandas específicas desse ambiente industrial, resultando em operações mais eficazes e seguras.

A investigação com robôs colaborativos autônomos e reconstrução 3D de ambientes hostis, como cavernas e minas subterrâneas (figura 5) é outro item que começa a ser explorado e evidencia-se diante dos desafios únicos e complexos que esses locais apresentam.

Figura 5 – Utilização de robô coloborativo autonômo na mineração

Fonte: Resende et. al. (2020).

A aplicação de técnicas de fotogrametria, aliada ao uso de robôs colaborativos autônomos, representa uma abordagem inovadora e promissora para superar as limitações impostas por esses ambientes inóspitos. A fotogrametria permite a captura de dados precisos a partir de imagens, enquanto os robôs colaborativos autônomos podem navegar de forma independente, alcançando áreas de difícil acesso para aquisição de informações detalhadas. Essa integração de tecnologias promete não apenas a reconstrução tridimensional confiável desses ambientes, mas também abre caminho para aplicações importantes, como exploração segura, mapeamento geológico avançado e análise de riscos ambientais. A pesquisa nesse domínio é crucial para impulsionar o entendimento e a utilização eficaz dessas ferramentas inovadoras, contribuindo para avanços substanciais na exploração e gestão de ambientes subterrâneos desafiadores.

4.2. VANTAGENS COMPETITIVAS DA ROBÓTICA COLABORATIVA NO SETOR AGRÍCOLA

Entre alguns dos principais motivos na limitação da utilização de tecnologias de robótica colaborativa em território brasileiro, consideram- se as mais importantes: o baixo custo de força de trabalho; uma limitação da quantidade de computadores instalados em áreas produtivas; alta carga de tributos para a importação de máquinas e outros equipamentos com tecnologia de ponta; um deficitário suporte técnico e o baixo nível de preparo profssional especializado; redução dos valores de comércio das mercadorias agrícolas; um decréscimo dos índices de produção na maioria das propriedades agrícolas; e os baixos valores financeiros das terras (Hackenhaar et. al., 2015).

Embora seja uma proposta ambiciosa que vise criar condições ou soluções altamente automatizadas ou especificamente técnicas, ainda há pouco acesso a essa realidade na grande maioria dos sistemas produtivos da agricultura rudimentar no Brasil. De acordo com Silveira (2012) A robótica e a tecnologia svoltadas para o campo, mais incisivamente para a denominada agricultura de precisão, essencialmente fomentam o volume de produção e o valor energético dos grãos, intrinsicamenteligada a um tipo de manipulação restrita e localizada na utilização de um conjunto de itens ligados á produção do setor, ou por assim dizer, de insumos.

Essa direção mais efetiva permite um aumento da capacidade de produção que inclinam-se em alcançar os mais altos patamares produtivos das glebas, muitas vezes alavancando a média de produção de grãos de 2 toneladas e meia por hectare para até 8 tonelas por hectare – tratando-se do trigo, por exemplo (Inamasu, 2011).

Por volta de 25% de todo volume de produção mundial de gêneros alimenticios vem sendo ameaçado, ano a ano, como resultado da insuficiência de água, ou pela ação de pragas mais destrutivas e resistentes aos defensivos agrícolas e que constantemente são agredidas pela destruição e empobrecimento dos campos cultiváveis. No geral, a indústria cresce em competitividade e aumenta sua atuação no mercado, conferindo maior tranquilidade e estabilidade, o que por consequência poderá aumentar os aportes financeiros e de pessoal, na capacitação destes profissionais e na melhoria dos processosde administração como um todo e sempre buscando manter- se no tempo de desenvolvimento de novas tecnologias, esta é uma percepção que pode se tornar realidade nos próximos anos.

4.3. PRINCIPAIS PANORAMAS E PERSPECTIVAS PARA A PRÓXIMA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

Conforme proposto por João Barata et al. (2023), pesquisas mais recentes, realizadas a partir de 2022, sobre a indústria 5.0 têm revelado novos pontos cruciais para seu desenvolvimento. Esses estudos abrangem principalmente a inteligência artificial, machine learning e a Internet das Coisas (IoT) como pilares essenciais, abrindo novas perspectivas para a convergência entre avanços tecnológicos e a construção de futuros mais promissores.

Além da Robótica colaborativa outros destaques de desenvolvimento tecnológico também devem ser observados durante esse período de transição: A customização da produção, o uso de Big Data incorporado aos robôs colaborativos e sistemas de tecnologia verde devem ser as principais escolhas por grande parte das empresas que atuam neste segmento.

Com a ampliação do Big Data e tratamento do volume elevado de dados, espera-se uma contribuição em tempo real com a otimização do design, dos meios de produção e com os ciclos de produtos, contribuindo com a redução do uso de recursos.

Todo o histórico relacionado com a cadeia produtiva poderá ser armazenada e utilizada como fontes de dados para novas pesquisas e possíveis incrementos no processo. O Big Data contribuirá para uma substancial mudança no modo como a manufatura se relaciona com o consumidor. O grande volume de dados poderá compreender desde a comunicação online dos consumidores sobre determinada marca ou produto até dados obtidos em tempo real de máquinas-ferramentas e robôs. Todas essas informações serão essenciais para que se possa refinar o processo de manufatura, e proporcionar a

customização por parte dos clientes.

Novos produtos irão possuir transdutores integrados e apresentarão autonomia, possibilitando o uso da Internet das Coisas (IdC) .

As interfaces homem-máquina propiciarão o trabalho colaborativo entre pessoas e máquinas. Na tecnologia atual as entradas de dados são efetuadas por humanos e aferidas mediante utilização de um software em um computador. Em dias próximos, as máquinas poderão receber comandos diretamente do cérebro humano, mediante utilização das ondas cerebrais, com o suporte de telas 3D com imagens 3D, do Big Data e dos sistemas de sensores e fazendo-se uso de simuladores.

A evolução da inteligência artificial apresenta-se como fundamental para esse processo colaborativo. A compreensão das linguagens e vozes humanas faz com que as máquinas realizem comandos com maior facilidade e portanto devem ser o cerne também desta nova revolução.

5. CONCLUSÃO

A massificação da utilização de novas tecnologias de materiais, produtos, processos, comunicação, informação e gestão, em conjunto com a evolução a hibridização de produtos e serviços, irão ocasionar profundas alterações estruturais, gerando oportunidades para a concepção de novos perfis empresariais e oportunidades em virtude desta nova revolução que está por vir.

A intensa utilização de novas tecnologias produtivas e o desenvolvimento de interfaces entre os consumidores e os sistemas de produção contribuirão para que se estabeleça novos modelos de negócios. Vale frisar sobre a atenção que se deve ter no que diz respeito ao processo de inserção e disseminação desse aparato tecnológico, pois, é prudente que seja acompanhado de modificações nas estruturas de origens sociais e econômicas, de maneira que possa introduzir as condições necessárias de projeções rentáveis para a adoção das novas técnicas.

As alterações da estrutura industrial deverá ser instigada, tanto em comércios locais quanto inter-regionais, fazendo-se uso dos novos conceitos de produção e consumo, nesta perspectiva, os robôs colaborativos ganham relevada importância, pois poderão contribuir com a otimização dos processos, diminuição de custos com segurança e contribuindo com o melhor aproveitamento dos espaços no interior das indústrias.

Esta tecnologia pode contribuir com o fechamento de postos de trabalho, mas esta realidade acompanha a evolução do homem, pois assim como não se utiliza mais máquinas de escrever e considerando o fato de que datilógrafos não estão entre os profissionais requisitados no mundodo trabalho do século XXI, haverá sempre a renovação dos postos de trabalho e, a utilização das tecnologias será fundamental para que se estruture uma sociedade sustentável, com modos de produção mais complexos que contribuam para o aumento da qualidade de vida da população, afinal as tecnologias foram criadas para melhorar a realidade do homem e, se bem utilizadas, irão possibilitar seu desenvolvimento.

Concluiu-se que a Robótica Colaborativa promoverá melhores condições de planejamentopara os gestores realizarem tomadas de decisão com maior eficiência além de contribuirem significativamente para aumento de produtividade e no aumento da qualidade sobre os processos produtivos, bem como promovem a redução de custos das

organizações, aumentando a competitividade mercadológica das mesmas.

REFERÊNCIAS

[1] BARATA, J.; KAYSER, I. **Industry 5.0 – Past, Present, and Near Future**. Procedia Computer Science, n.219 International Conference on ENTERprise Information Systems/ ProjMAN –International Conference on Project Management. 2023

[2] BLACKMORE, S. M.; GRIEPENTRONG, H. W. **Autonomous Vehicles and Robotics**. Chapter 7, Section 7.3. Mechatronics and Applications. v. 6, pp. 204-215. ASAE CIGR Handbook of Agricultural Engineering, 2006.

[3] BOOK, W.; WINCK, R.; KILLPACK, M.; HUGGINS, J.; DICKERSON, S.; JAYARAMAN,S.; COLLIN, T.; PRADO, R. **Automated garment manufacturing system using novel sensing and actuation.** Proceedings of 2010 ISFA. 2010 International Symposium on Flexible Automation. Tokyo, Japan, Jul. 12-14, 2010.

[4] BREQUE, M.; NUL, L. de; PETRIDIS, A. **Industry 5.0 Towards a sustainable, human- centric and resilient European industry**. Research and Inovation paper series, vol. I. 2021

[5] BREITENBACH, R. **Gestão rural no contexto do agronegócio: desafios e limitações**. Desafio Online, 2(2), 141-159. 2014

[6] BRUNO, FLAVIO DA SILVEIRA. **A Quarta Revolução Industrial do Setor Têxtil e de Confecção**: a visão de futuro para 2030. 1. ed., 149 p. ISBN: 978-85-68552-31-5 . São Paulo: Estação das Letras e Cores, 2016.

[7] CAJUEIRO, Roberta Liana Pimentel. **Manual para elaboração de trabalhos acadêmicos**: guia prático do estudante. 3. ed. [S. l.]: Vozes, 2012. 112 p. ISBN-10 853264354X. ISBN-13 978-8532643544.

[8] Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA. **Índices Exportação do Agronegócio - 3º Trimestre de 2019**. Piracicaba: CEPEA, ESALQ/USP, 2020. Disponível em:https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Cepea_ExportAgro_3trimestre2019_(2).pdf

[9] CRESTANA, S.; FRAGALLE, E. P. **A Trilha da quinta potência: um primeiro ensaio sobre ciência e inovação, agricultura e instrumentação agropecuária brasileira**. v. 1, n. 1, pp. 6-27. Brasília: Revista Eixo, 2012.

[10] DAEMON, Flávia Xavier Moreira. **A cooperação homem-robot em sistemas de produção flexíveis e reconfiguráveis:** contribuições para uma metodologia de desenho de linhas de produção. 2017. 152 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto: FEUP, 2017.

[11] DIAS, Amanda Ribeiro. **MINERAÇÃO 4.0: A EVOLUÇÃO E OS BENEFÍCIOS DA INDÚSTRIA 4.0 NO SETOR DA MINERAÇÃO**. Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia). Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. 2023

[12] DICKENS, P.; KELLY, M.; WILLIAMS, J. R. **What are the significant trends shaping technology relevant to manufacturing?** Future of Manufacturing Project, Evidence Paper n.6. Foresight. out. 2013. London: The Government Office for Science, 2013.

[13] EMEAGWALI, I. **Performance Analysis of Steady-Hand Teleoperation versus Cooperative Manipulation**. Symposium on Hapit Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. Chicago: IEEE Virtual Reality, 2004.

[14] EUROBOTICS. **Challenge 2**: Cognitive Systems, Interaction, Robotics. FP7-ICT-244852; 01/2010-12/2012. Eurobotics - European Robotics Coordination. Eurobotics, 2012.

[15] FANUC. (2018a). **A AGI utiliza robôs em células de moldagem por injeção para aumentar a produtividade**. FANUC Robotics Company. Disponível em: https://www.fanuc.eu/pt/pt/casos-de-clientes/agi. Acesso em: 1 fev. 2020.

_____(2018b). **A BENTELER Automotive de Schwandorf, na Alemanha, utiliza o robô colaborativo CR-35iA da FANUC num movimento automatizado, sem barreiras de segurança e à velocidade máxima.** FANUC Robotics Company. Disponível em: https://www.fanuc.eu/pt/pt/casos-de-

clientes/benteler. Acesso em: 1 fev. 2020.

[16] FISPAL TECNOLOGIA. **3 vantagens de inserir robôs na linha de produção de alimentos**. Artigo publicado em 20 de junho de 2018. Disponível em: https://digital.fispaltecnologia.com.br/3-vantagens-de-inserir-robos-na-linha-de-producao-de- alimentos/. Acesso em: 1 fev. 2020.

[17] FORESIGHT. **The Future of Manufacturing**: a newera of opportunity and challenge for the UK. Summary Report. London: The Government Office for Science, 2013.

[18] GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017. 192 p. ISBN-10: 8597012617. ISBN-13: 978-8597012613.

[19] GOLNABIA, H.; ASADPOURB, A. **Design and application of industrial machine vision systems**. v. 23, pp. 630-637. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007.

[20] GRIFT, T. E. **Robotics in Crop Production**. Illinois: Urbana, 2007.

[21] HACKENHAAR, Neusa Maria; HACKENHAAR, Celso; ABREU, Yolanda Vieira de **Robótica na agricultura**. 11 p. v. 16, n. 1, pp. 119-129, jan./jun. 2015. Campo Grande: Revista Interações, 2015.

[22] INAMASU, R. **Agricultura de precisão para a sustentabilidade de sistemas produtivos do agronegócio brasileiro.** Ribeirão Preto: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2011.

[23] ISO International Organization for Standardization. ISO 10218-1:2011. **Robots and robotic devices** -- Safety requirements for industrial robots -- Part 1: Robots.

[24] ISO International Organization for Standardization 15066:2016**. Robots and robotic devices** -- Collaborative robots.ISO - International Organization for Standardization. ISO, 2016.

[25] LÜDKE, Menga; ANDRÉ, Marli Elisa D. A. de. **Pesquisa em educação**: abordagens qualitativas. 2. ed. São Paulo: EPU, 2013.

[26] MADDIKUNTA, P. K. R.; PHAM,Q.; PRABADEVI, B.; NEEPA, N.; DEV, K.;GADEKALLU, T.R.; RUBY, R.; LIYANAGE, M.; Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. Journal of Industrial Information Integration, 2021.

[27] MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Metodologia do trabalho científico**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017. 256 p. ISBN-10 8597010665. ISBN-13 978- 8597010664.

[28] MULLER, J. **Enabling technologies for Industry 5.0**. European Commission. Workshop of Research and Inovation. 2020

[29] NOGUCHI, N. **Development of Automated and Robot Agriculture in Japan**. Sapporo: Journal of Agricultural Engineering Research, 2010.

[30] OLIVEIRA, R. P. **Agricultura de precisão**: a Tecnologia da Informação em suporte ao conhecimento agronômico clássico. Ano 11, n. 15, pp. 63-71, jul./dez. 2009. Rio de Janeiro: Revista Tecnologia & Cultura, 2009.

[31] RESENDE FILHO, L. W.; DIAS BARROS, L. G.; ALVES, P. H. T. F.; PESSIN, G.; GARCIA, G.; NASCIMENTO, R. G.; TORRES, A.; LIMA, M.; ALMEIDA, L.; SANTOS, I.; MAGNA, M. **Relatório de experimentos de campo na Mina do Salobo** . Relatorio tecnico, Instituto Tecnológico Vale, 2020.

[32] RIBEIRO, Fernando Manuel da Silva. **Sistema Robótico Colaborativo utilizando Restrições Virtuais**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica). FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto: FEUP, 2010.

[33] ROTHER, Edna Terezinha. **Revisão sistemática x revisão narrativa**. Acta Paulista de Enfermagem, São Paulo, v. 20, n. 2, p. 5-6, 2007.

[34] SILVA, Denise Guerreiro Vieira da; TRENTINI, Mercedes. **Narrativas como técnica de pesquisa em enfermagem.** Revista Latino-Americana de Enfermagem, Ribeirão Preto, v. 10, n. 3, maio/jun. 2002.

[35] SILVEIRA, Paulo Cezar Rocha. **Robô baseado em tecnologia celular Android e lógica nebulosa para inspeção e monitoração em usinas nucleares**. 2012. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear). COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós- Graduação e Pesquisa de Engenharia. UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ, 2012.

[36] SUBEESH, A., & MEHTA, C. R. **Automation and digitization of agriculture using artificial**

intelligence and internet of things. Artificial Intelligence in Agriculture ,ed. 5,.2021.

[37] SKENDERAS, D.; POLITI, C. **Industry 4.0: Roadmap for the Mining Sector**. 2nd International Conference on Raw Materials and Circular Economy. School of Mining and Metallurgical Engineering, National Technical University of Athens. 2023

[38] TALAVIYA, T., SHAH, D., PATEL, N., YAGNIK, H., & SHAH, M.. **Implementation of Artificial Intelligence in Agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides**. Artificial Intelligence in Agriculture.2020

[39] TANGERINO, Giovana T.; GODOY, Eduardo P.; TABILE, Rubens A.; SANCHES, Rodrigo M.; INAMASU, Ricardo Y.; PORTO, Arthur J. V. **Controle de Esterçamento de Robô Agrícola Móvel de Quatro Rodas Guiáveis**. X SBAI – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. 18 a 21 de setembro de 2011 . São João del-Rei - MG - Brasil. v. 10, pp. 797-802. ISSN: 2175-8905. São João del-Rei: SBAI, 2011.

[40] TANKE, Niels F.; LONG, Guoming A.; AGRAWAL, Dhruv; VALADA, Abhinav; KANTOR, George A. **Automation of Hydroponic Installations using a Robot with Position Based Visual Feedback**. 6 p. Pittsburgh: The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 2011.

[41] TRENTINI, Mercedes; PAIM, Lygia. **Pesquisa em enfermagem**. Uma modalidade convergente-assistencial. Florianópolis: Editora da UFSC, 1999.

[42] ULEWICZ, R.; KRSTIĆ, b.; INGALDI, m. **Mining Industry 4.0 Opportunities and Barreiers**. Acta Montanistica Slovaca, Volume 27 (2), 291-305. 2022

[43] VITALLI, Rogério. **Reforço Superinteligente**. O chão de fábrica recebe a nova geração de robôs colaborativos, que traz mais inovação no seu DNA. Produtuvidade. pp. 18-21, jan. 2017. O Mundo da Usinagem, 2017.

[44] WANNASUPHOPRASIT, W. **Cobots:** Collaborative Robots. Evanston: Northwestern University, 1999.

[45] WANNASUPHOPRASIT, W.; MOORE, C. A.; GILLESPIE, R. B.;AKELLA, P. **Cobot Architecture**. v. 17, n. 4, pp. 337-390. IEEE Transactions on Roboticand Automation, 2001.

Capítulo 11

Estudo da dissolução de poliestireno expandido utilizando solventes e resíduos terpênicos

Mônica Beatriz Kolicheski
Ana Paula Lucca Ribeiro

Resumo: O poliestireno expandido (EPS) – conhecido como Isopor® - após o consumo possui baixa taxa de reciclagem devido ao custo associado ao tratamento. Esse resíduo origina volumes elevados em função da sua baixa densidade e, em geral, a destinação é incorreta. Desta forma este estudo avaliou a dissolução do EPS pós-consumo doméstico com solventes terpênicos e a possibilidade de obtenção de resina para a produção de verniz. A análise da dissolução foi realizada em função do tipo de solvente, concentração de EPS e o tempo de dissolução. A avaliação da empregabilidade da resina como verniz foi qualitativa em relação à aplicação do verniz e ao revestimento, brilho e textura conferidos à superfície da madeira. Os solventes terpênicos analisados foram: terebintina (63% de β-pineno, 30% de α-pineno), óleo essencial de laranja (~80% de d-limoneno, 14% de β-mirceno), α-pineno (93% de α-pineno) e dois tipos de resíduos da indústria de solventes naturais, denominados de resíduo I (44% de d-limoneno, 18% de p-cimeno e ~15% de β-pineno) e resíduo II (~39% de d-limoneno, 19% de *p*-cimeno, ~9% de β-mirceno, 8% de α-dihidroterpineol e 7% de β-pineno). A dissolução do Isopor® está diretamente relacionada com a quantidade de solventes, o que foi evidenciado neste estudo pois a velocidade de dissolução aumentou com o aumento da quantidade de solvente. Os melhores solventes para a dissolução do EPS pós-consumo foram o óleo essencial de laranja (OEL) e os resíduos industriais, sendo que o resíduo I teve melhor desempenho que o resíduo II. Foi possível utilizar a resina como verniz. Pela análise qualitativa - após a secagem do verniz - os melhores resultados foram para as resinas preparadas com OEL e resíduo II como solventes. A qualidade do revestimento da madeira com o verniz produzido a partir do resíduo I foi inferior. Para avaliar o tempo de dissolução do resíduo II com e sem agitação, com diferentes concentrações de EPS pós-consumo, foi realizada uma análise estatística (ANOVA e teste Tuckey). Concluiu-se que o resíduo II possibilitou a produção de um verniz de qualidade similar ao obtido com com OEL como solvente.

Palavras-chave: Isopor, Solventes, d-Limoneno, Resíduos industriais.

1. INTRODUÇÃO

O poliestireno[1] expandido (EPS), popularmente chamado de Isopor®[2], e também conhecido pela sigla EPS (*Expanded Polystyrene)* é amplamente utilizado por suas propriedades técnicas – leveza, resistência e facilidade de moldagem – e diversos tipos de aplicações. Propriedades estas que estão associadas a estrutura celular do polímero, a qual consiste em pequenas esferas ocas. A estrutura celular fechada confere ao EPS as suas características únicas e permite que o mesmo seja produzido em diferentes densidades e, consequentemente com diferentes propriedades físicas e aplicações.

Tecnicamente o poliestireno é um homopolímero obtido pela polimerização do estireno que é um hidrocarboneto aromático não saturado. Ao ser expandido as esferas de poliestireno aumentam em muitas vezes de tamanho e formam o EPS, que possuiu somente em 2% de polímero sendo os outros 98% são de ar (Abrapex, 2021). De acordo com Tessari (2006) o polímero é obtido por meio da expansão do poliestireno, sendo que esta é realizada injetando-se um agente químico (em geral pentano) durante a reação da polimerização. Connor (2019) esclarece que o poliestireno pode ser expandido (EPS) ou extrudado (XPS). Ambos são feitos de poliestireno, mas o EPS é composto de pequenas esferas que são fundidas e o XPS é produzido com o material fundido que é pressionado no extrusor no formato de placas de espuma, e, portanto, o seu uso principal é como isolante térmico e acústico.

As vantagens do EPS estão relacionadas à sua compressão, resistência, tração e flexão, além de sua capacidade de reter calor (Kerber, 2017). Porém, mesmo tendo uma estrutura de célula fechada, existem lacunas intersticiais que formam uma rede aberta de canais entre as esferas de EPS, consequentemente são permeáveis à água e, principalmente pelo vapor (Connor, 2019).

Devido às suas propriedades únicas o poliestireno é utilizado nas mais diversas áreas, desde a fabricação de embalagens de proteção (caixas) e até em aplicações especificas como na confecção de peças automotivas e na construção civil como isolante térmico (Tessari, 2006). De acordo com Kerber (2017) o custo-benefício do EPS é baixo, sendo assim é amplamente utilizado. O que é confirmado pela a EPS Brasil (2023) que mostrou que o consumo aparente[3] e a produção de EPS no Brasil cresceram, respectivamente, a uma taxa anual de 7,3% e 4,9% entre 1999 e 2023. Na mesma base de comparação, as exportações cresceram a uma velocidade muito maior, de 15,8% a.a, enquanto as importações a 1,2% a.a. Ainda, segundo a Abrapex (2021), em razão da importância do EPS para a indústria brasileira, existem fabricantes espalhados nas 5 regiões do Brasil e com produção em larga escala.

Contudo o EPS possui impacto ambiental em solos, rios e lagos - quando descartado incorretamente. As partículas de EPS são confundidas com alimento e geram intoxicação em peixes, tartarugas e demais animais marinhos e terrestres. O poliestireno expandido é 100% reciclável, porém a taxa de reciclagem é baixa, em torno de apenas 30%. Por conter praticamente 98% de ar em sua composição a reciclagem do EPS não é atrativa para recicladores e cooperativas de reciclagem (Isorecort, 2023; Abrapex, 2021). Outra desvantagem da reciclagem está relacionada com a logística reversa do ESP pós-consumo pois existem dificuldades em relação ao transporte e armazenamento do resíduo. Por possuir baixa densidade o volume ocupado é elevado e, consequentemente, as

[1]O poliestireno é um polímero aromático sintético pertencente ao grupo das resinas termoplásticas.
[2]Marca registrada pela Knauf Isopor Ltda
[3]Consumo Aparente Nacional = (Produção + Importação) – Exportação.

recicladoras precisam de grandes espaços para o armazenamento e o valor do frete é elevado quando se considera a baixa massa de EPS pós-consumo transportada (Isorecort, 2023; Kerber, 2017).

Contudo de acordo com Garcia e Robertson (2017) estudos recentes indicam para a possibilidade de tecnologias de reciclagem química que permitirão a expansão de reciclagem a polímeros tradicionalmente não recicláveis. Os autores, porém, ressaltam sobre o desafio permanente de assegurar que o desempenho do material reciclado para poder ser reinserido novamente no ciclo produtivo.

1.1. RECICLAGEM DO POLIESTIRENO EXPANDIDO

A reciclagem do EPS pode ser realizada de diferentes métodos: *i.* químico, com a produção de solventes e colas, *ii.* energético, na qual o resíduo é utilizado para a geração de energia elétrica e térmica e *iii.* mecânico, com a produção de outros polímeros (Abrapex, 2021). O EPS pós-consumo triturado é fundido na reciclagem térmica e solubilizado na reciclagem química, após estas etapas o polímero obtido pode ou não ser transformado em *pellets*. Em ambos os casos pode ser utilizado como matéria-prima para a fabricação de brinquedos, materiais didáticos, solado para calçados, peças técnicas, concreto leve, molduras para quadros, perfis e peças decorativas, colas e vernizes, exceto para ser usado na indústria alimentícia (Meiwa, 2023; Soeira, 2019). Este estudo focou na reciclagem química.

De acordo com Cella (2012) a dissolução do EPS em solventes orgânicos é uma alternativa viável para a reciclagem do polímero. Em estudos realizados por Soeira (2019) a dissolução do poliestireno expandido em solvente natural ocasionou uma diminuição do volume do material e não degradou a cadeia molecular do EPS, gerando um material reciclado com características satisfatórias para usos posteriores.

Os solventes naturais constituídos por terpenos possuem semelhanças estruturais com o EPS e, portanto, esses foram utilizados neste estudo, o qual propôs a dissolução do poliestireno expandido com o foco de minimizar a problemática ambiental causada pelo Isopor®. A dissolução do EPS foi avaliada com três solventes terpênicos (óleo essencial de laranja, α-pineno e terebintina) e dois resíduos terpênicos.

Conforme Soeira (2019) o EPS dissolvido em terpenos possibilita a elaboração de formulações de resina base para a produção de vernizes e tintas. Essa pode incluir plastificante ftalalato e vegetal e, ao ser aplicada, sobre a madeira gera uma película que concede brilho ao material. Desta forma a resina obtida com a dissolução do EPS foi avaliada como de verniz para madeira, porém sem a adição de agentes plastificantes.

1.2. SOLVENTES TERPÊNICOS PARA A RECICAGEM DE EPS

De acordo com Garcia el al. (2009) um bom solvente natural usado para a reciclagem de poliestireno extrudado deve ter uma alta capacidade de dissolução e degradar minimamente a cadeia do polímero. Ainda para os autores o poliestireno é um polímero apolar e não ligado a hidrogênio e, portanto, é solúvel em solventes terpênicos como o *d*-limoneno, γ-terpineno, *p*-cimeno, e o α-felandreno, enquanto não é solúvel em álcoois terpênicos como o linalol, geraniol, mentol e terpineol, que possuem polaridade inferior aos terpenos. Destes o mais citado na literatura para a reciclagem de EPS foi o *d*-limoneno.

O uso do *d*-limoneno como solvente industrial remonta ao início da década de 1990, quando o terpeno começou a ser usado como substituto do tricloroetileno - que é altamente tóxico – na indústria de microeletrônica. Este solvente possui baixa toxicidade, é ambientalmente seguro e mais eficaz que as os agentes de limpeza tradicionais. Pode substituir uma grande variedade de substâncias como, por exemplo, hexano, aguarrás mineral, butanona, tolueno, xileno, éteres de glicol e solventes orgânicos clorados e fluorados, além de possuir aplicações tanto na indústria - petrolífera, automóvel, de pavimentação e eletrônica – como para uso doméstico, ou seja, para a produção de produtos de limpeza de uso doméstico (Pagliaro, Tixer, Ciriminna, 2023; Pires, Ribeiro, Machado, 2017).

O *d*-limoneno é um hidrocarboneto cíclico (monoterpeno) e sob condições ambientes está no estado líquido, sendo incolor e volátil. Quimicamente, pode ser definido como "alceno natural", isto é, apresentam uma dupla ligação carbono-carbono sendo e, portanto, um hidrocarboneto insaturado (Felipe e Bicas, 2017). Este terpeno pode ser obtido por extração de frutas cítricas como laranja e limão, extração de resíduos da indústria de sucos de laranja, limão e ponkan ou pela isomerização térmica do α-pineno (Batista et al., 2023; Soeira, 2019; Yermakova et at., 2007). A obtenção de *d*-limoneno a partir da extração de cítricos possui elevada qualidade e propriedades distintas, porém alto preço sendo de 10 a 100 vezes superior ao sintético (Maróstica Júnior e Pastore, 2007).

De acordo com Felipe e Bicas (2017) o óleo essencial de casca de laranja (OEL) possui como principais constituintes: monoterpenos (*d*-limoneno, β-mirceno); sesquiterpeno (valenceno); monoterpenoides (decanal, linalol, neral, geranial, citronelal); sesquiterpenoides (β-sinensal, α-sinensal) e outros compostos (octanal). E para Zardo et. al. (2019). em decorrência da semelhança química entre os constituintes majoritários presentes nos OEL este se apresenta como um bom solvente natural para a reciclagem de EPS.

Estudos realizados por Garcia el al. (2009) para a reciclagem do XPS com solventes terpênicos mostraram uma redução de volume de mais de 100 vezes, sem degradação das cadeias poliméricas - o peso molecular não alterou - e foi obtido um polímero reciclado de alta qualidade. Os autores também indicaram que a reciclagem química com solventes naturais foi um método de baixo custo e eficiente para a reciclagem de XPS, pois o solvente pode ser facilmente recuperado por destilação. Silva (2021) ressalta ainda que a reciclagem por dissolução do EPS com o uso de *d*-limoneno foi satisfatória e sustentável tanto no aspecto ambiental como no econômico.

Com base na boa eficiência do *d*-limoneno para a reciclagem de EPS, neste estudo foram utilizados dois resíduos da indústria de solventes naturais contendo de 38% a 44% de *d*-limoneno. Também foram testados como solvente o OEL, a terebintina e o α-pineno obtidos pela extração de cascas de laranja, destilação de goma resina e destilação de terebintina, respectivamente, ou seja, todos os solventes avaliados foram provenientes de fontes naturais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. MATÉRIA PRIMA

O EPS utilizado neste estudo foi obtido pós-consumo doméstico - embalagens de alimentos no formato de bandejas de coloração branca de diferentes fabricantes – o qual

foi lavado e seco antes da realização dos ensaios de dissolução. No laboratório o EPS foi fragmentado manualmente em pequenos pedaços e armazenado em recipientes fechados.

2.2. SOLVENTES TERPÊNICOS UTILIZADOS PARA A DISSOLUÇÃO DO EPS PÓS-CONSUMO

Os solventes terpênicos utilizados foram o óleo essencial de laranja doce (OEL), o □-pineno, a terebintina e dois resíduos terpênicos. O OEL 100% puro foi obtido no comércio local (Legeé Óleos Essenciais) e os demais solventes e resíduos foram fornecidos pela empresa SOCER Brasil Indústria e Comércio LTDA. Os solventes utilizados tinham a composição[4] indicada na Tabela 1.

2.3. DISSOLUÇÃO DO EPS PÓS-CONSUMO COM OEL

A metodologia para a dissolução do resíduo de Isopor® com OEL foi adaptada de Silva, Freitas e Rocha (2021). Inicialmente pesou-se 0,5 g de fragmentos de EPS pós-consumo em balança analítica (Instrutherm, modelo BD-200) utilizando uma placa de vidro. Nesta etapa do estudo foram utilizadas foram de diferentes marcas de EPS. Em um béquer de 50 mL adicionou-se 3 mL de OEL e acrescentou-se, lentamente, o EPS fragmentado. Com auxílio de um bastão de vidro agitou-se até a completa dissolução. Nos casos em que não se obteve a saturação da suspensão pesou-se mais 0,5 g de EPS fragmentado sendo o mesmo transferido para o béquer, a suspensão era agitada novamente até se obter uma suspensão homogênea e saturada.

Tabela 1 – Composição[4] dos solventes terpênicos utilizados no estudo

Componente	Terebintina	OEL	□-Pineno	Resíduo I	Resíduo II
Canfeno	-	-	2,14	-	-
Carene	-	-	-	2,13	-
p-Cimeno	-	-	-	19,83	19,34
α-Dihidroterpineol	-	-	-	2,08	8,49
α-Felandreno	-	-	0,22	-	-
Fenchol	-	-	-	-	1,64
d-Limoneno	-	79,76	-	44,52	38,80
Ψ-Limoneno	-	0,80	-	3,38	1,09
Linanol	-	0,74	-	-	-
p-Mentadieno					2,43
β-Mirceno	3,93	14,50	-	14,79	8,84
α-Pineno	30,22	0,66	93,2	1,73	2,29
β-Pineno	63,41	3,11	2,57	4,26	7,45
α-Terpineno	-	-	-	4,89	1,95
γ-Terpineno	-	-	-	0,76	1,88
α-Terpineol	-	-	-	-	3,28
Outros	2,44	0,44	1,87	1,63	2,52

[4]As análises cromatográficas foram realizadas no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento da SOCER Brasil Indústria e Comércio LTDA.

2.4. PRECIPITAÇÃO DO POLÍMERO OBTIDO

A precipitação do polímero também seguiu a metodologia proposta por Silva, Freitas e Rocha (2021). À solução saturada de EPS foi adicionado 1,5 mL de etanol 96% (92,8 INPM). Transferiu-se o conteúdo para um tubo de centrífuga. Para garantir a retirada de todo o material utilizou-se uma espátula. A amostra foi centrifugada por 3 minutos e 3000 rpm (Centribio - Macro Max 80-2B). Retirou-se o sobrenadante com uma pipeta de Pasteur e o tubo de ensaio com o polímero foi seco à ~180°C, por 30 minutos em estufa com circulação forçada (Solab - SL-102). Após a secagem foi realizada a análise qualitativa da resina obtida logo após a retirada da estufa e após uma semana. Os tubos foram mantidos em temperatura e pressão ambiente.

2.5. AVALIAÇÃO DE DIFERENTES SOLVENTES TERPÊNICOS PARA A DISSOLUÇÃO DE EPS PÓS-CONSUMO E APLICAÇÃO COMO VERNIZ

A metodologia para o teste com diferentes solventes terpênicos (terebintina, α-pineno, resíduo I e resíduo II) seguiu a mesma metodologia descrita no item 2.3, porém com o diferencial de que se fixou 0,5 gramas de EPS fragmentado mesmo para os cenários em que não se obteve a saturação da suspensão. Na etapa de precipitação do polímero (item 2.4) foram usados 3 mL de etanol 96% (92,8 INPM).

Para a validação da aplicação da resina obtida, após a precipitação do EPS e secagem, como verniz foi realizado o preparo da placa de madeira. Primeiramente foram retiradas as imperfeições da placa de madeira com uma lixa d'água, após retirar a sujidade, desenhou-se a lápis quadrados de 2 cm, os quais foram identificados de modo a possibilitar a comparação entre os ensaios realizados. A resina foi aplicada na placa de madeira com o auxílio de uma espátula. Para avaliar o brilho e a textura - de forma qualitativa - esperou-se a secagem completa do verniz em condições de temperatura e pressão ambiente.

2.6. OTIMIZAÇÃO DA DISSOLUÇÃO DE EPS PÓS-CONSUMO PARA OS MELHORES SOLVENTES

Para obter a quantidade ideal de solvente para a dissolução do EPS pós-consumo foi avaliado o desempenho qualitativo do verniz. Nesta etapa foram realizados ensaios com os solventes selecionados no item 2.5 e avaliou-se a concentração de EPS para a obtenção de verniz. Foram utilizados 0,5 g de EPS, o qual foi adicionado - após pesagem em placa de vidro - diretamente no tubo de ensaio. Ao tubo adicionou-se a quantidade de solvente necessária para obter as concentrações de 1,00 $g.mL^{-1}$, 0,50 $g.mL^{-1}$, 0,25 $g.mL^{-1}$, 0,10 $g.mL^{-1}$ e 0,01 $g.mL^{-1}$. As resinas obtidas após a precipitação do polímero (item 2.4) foram aplicadas em uma placa de madeira de superfície plana previamente preparada (item 2.5). Após a secagem em temperatura e pressão ambiente foi realizada a avaliação qualitativa do verniz. Foram observados aspectos relacionados a aplicação do vernos na madeira, a qualidade do revestimento do verniz e o aspecto visual (brilho e textura) do verniz após a secagem.

2.7. AVALIAÇÃO DO TEMPO DISSOLUÇÃO DE EPS PÓS-CONSUMO PARA O SOLVENTE SELECIONADO

Com o intuito de avaliar a influência da agitação e da concentração de EPS no tempo de dissolução foram realizados ensaios com o EPS pós-consumo de uma única marca

Copobras (CF066). Para esta avaliação pesou-se 0,5 g de EPS fragmentado em balança analítica (Instrutherm, modelo BD-200) com auxílio de uma placa de vidro. Na própria placa de vidro adicionou-se o solvente de acordo com os resultados obtidos no item 2.6. Após a adição do solvente iniciou-se a cronometragem do tempo até a completa dissolução do EPS. Também foi avaliada a dissolução do EPS com e sem agitação. Nos ensaios realizados com agitação foi utilizado um bastão de vidro com movimentos circulares até a completa dissolução do EPS. Para os ensaios sem agitação aguardou-se o tempo necessário para atingir a completa dissolução sem nenhum tipo de agitação. Os ensaios foram realizados em triplicata e os resultados obtidos foram analisados estatisticamente pela ANOVA e teste de Tukey.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em 2021 o consumo de EPS no Brasil foi de 129.500 toneladas, valor 3,36% inferior ao de 2020 (EPS Brasil, 2023). Mesmo com a queda a quantidade consumida deste polímero é elevada e, considerando, que a taxa de reciclagem de 30% (Isorecort, 2023) - somente em 2021 - aproximadamente 90.000 toneladas de EPS não retornaram para o ciclo produtivo. Mesmo sendo 100% reciclável não é dado ao Isopor® pós-consumo um destino correto. Fato que pode ser justificado pela falta de conhecimento da população brasileira sobre: *i.* a possibilidade de reciclagem do EPS; *ii.* a existência de pontos de coleta e *iii*. que o EPS pode ser incluído na coleta seletiva dos munícipios que possuem este tipo de serviço.

A logística reversa do EPS – por ser um polímero – é a mesma de garrafas PET e outros tipos de polímeros, e seria facilmente assimilada pela população, desde que sejam realizadas campanhas de educação ambiental. Iniciativas neste sentido estão sendo realizadas pelos fabricantes de EPS visando o atendimento da PNRS (Lei nº 12.305/2010), porém essas ações ainda são incipientes. Fato que é evidenciado por levantamento realizado em 2016 no qual se verificou que apenas 7% dos brasileiros sabiam que o EPS é totalmente reciclável (MUNDO ISOPOR, 2016).

Em 2019, a grande maioria (93%) dos entrevistados em estudo realizado por Souza et al. (2019) desconheciam a existência de pontos de coletas para Isopor®. O desconhecimento por parte dos entrevistados provavelmente está relacionado ao pequeno número de pontos de coleta no Brasil. Segundo Meiwa (2023) e Knauf (2018) existem somente 159 pontos de coleta, os quais atentem os nove estados do país (AM, BA, GO, MG, PE, PR, RS, SC e SP) e em alguns estados existe apenas um ponto de coleta. O estado com o maior número de locais para a coleta é São Paulo. Estes dados indicam a possibilidade de ampliação da coleta e, consequentemente, aumento da taxa de reciclagem do EPS pós-consumo no Brasil. Contudo devido ao grande volume ocupado e a baixa massa transportada o retorno financeiro é baixo. Isto diminui o interesse das cooperativas e das empresas de reciclagem em investir na reciclagem do EPS pós-consumo e desmitificar que o Isopor® não é reciclável.

Desta forma a reduzir do volume existe a reciclagem química pela solubilização do EPS pós-consumo com solventes. Esta foi a tecnologia avaliada neste estudo e a mesma amplia as possibilidades de logística reversa para este polímero, além de minimizar os impactos ambientais gerados pelo descarte incorreto. De acordo estudos realizados por Soeira (2019), Cella (2012) e Garcia el al. (2009) existe a alternativa de dissolução do EPS por alguns tipos solventes orgânicos, a qual ocorre devido às características do polímero serem semelhantes às dos solventes. Dentre os solventes com estas características estão os solventes terpênicos – ou naturais - como o óleo essencial de laranja que é rico em *d*-

limoneno. Desta forma na primeira etapa deste estudo avaliou-se a solubilização do EPS pós-consumo com o OEL.

3.1. AVALIAÇÃO DA DISSOLUÇÃO DO EPS PÓS-CONSUMO COM OEL E PRECIPITAÇÃO DA RESINA

Para a avaliar a dissolução do EPS pós-consumo os ensaios foram realizados com dois tipos de EPS da marca MEIWA (M-01 e HM-06). Os resíduos eram de embalagens de alimento pós-consumo no formato de bandejas e de coloração branca. As bandejas estavam livres de sujidades e de falhas e foram fragmentadas manualmente, sem a separação dos tipos de EPS.

Inicialmente utilizou-se 1,5 g de resíduo (Amostra A) e a saturação máxima foi obtida com a adição de 3 mL de solvente e desta forma, como esperado, a dissolução do EPS com OEL foi confirmada. O ensaio também permitiu verificar que com o aumento da concentração de EPS a velocidade de dissolução diminuiu. Porém, na etapa de precipitação do polímero, após a adição de etanol, observou-se uma consistência similar à cola e ocorreu a aderência da resina nas paredes do béquer, impedindo a transferência desta para o tubo de centrífuga (Figura 1).

Figura 1 – Precipitação do polímero obtido após a dissolução do EPS pós-consumo

Fonte: As autoras (2023).

Para possibilitar a centrifugação acrescentou-se mais 2 mL de etanol ao béquer o que possibilitou centrifugação. De forma a evitar a perda de polímero na transferência do béquer para o tubo de centrifuga a dissolução do EPS pós-consumo nas demais etapas do estudo foram realizadas diretamente nos tubos de centrifuga. E para evitar a adesão do polímero nas paredes do béquer um segundo ensaio foi realizado utilizando somente 0,5 g de resíduo (Amostra B) e se manteve a quantidade de solvente (3 mL de OEL). Neste ensaio a dissolução ocorreu satisfatoriamente devido à baixa concentração de EPS, porém verificou-se que 2 mL seriam suficientes para a dissolução. Para a precipitação do polímero foram necessários 3,5 mL de etanol, volume superior ao proposto por Silva, Freitas e Rocha (2021).

A Tabela 2 resume as quantidades de EPS pós-consumo e o volume de OEL e de etanol utilizados nos ensaios.

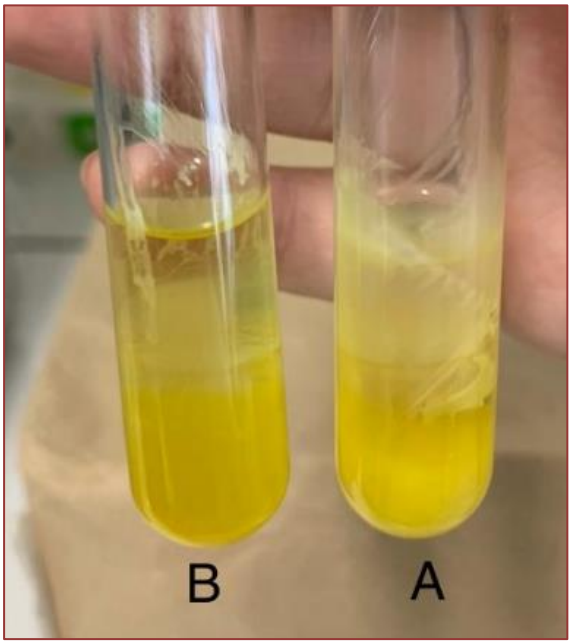
Tabela 2 – Quantidades de EPS pós-consumo, solvente e agente precipitante utilizados nos ensaios

Amostra	Massa de EPS (g)	Volume OEL (mL)	Concentração ($g.mL^{-1}$)
A	1,5	3,0	0,50
B	0,5	3,0	0,17

Fonte: As autoras (2023).

A adição de etanol proporcionou a precipitação praticamente instantânea do EPS e, após a centrifugação, a separação de fases polímero (incolor) e solvente (amarelo) foi eficiente e não se percebeu diferenças significativas entre as amostras A e B (Figura 2). Foi notória também a presença de uma fina camada de polímero nas paredes do tubo.

Figura 2 – Resina obtida após a dissolução do EPS pós-consumo e precipitação



Fonte: As autoras (2023).

Após a secagem na estufa a ~180 ºC ocorreu a evaporação do solvente excedente o que permitiu a fusão do material, transformando-o em uma mistura homogênea. Após uma semana em temperatura ambiente, o tubo de ensaio contendo maior concentração de EPS (Amostra A) solidificou e o outro (Amostra B) permaneceu na fase líquida, porém com elevada viscosidade.

Estudos realizados por Hattori et al. (2008) apud Silva (2021) também mostraram que os monoterpenos, como o *d*-limoneno, dissolveram poliestireno em alta concentração e que o produto obtido possuía diversas aplicações como, por exemplo, para a produção de polímeros de alta resistência e a fabricação de capas protetoras para celular. Assim o

poliestireno obtido após a dissolução, precipitação e remoção do solvente pode voltar a cadeia produtiva na forma de *pellets*, ou seja, poderia ser comercializado, de acordo com Tessari (2006) como poliestireno de propósito geral (GPPS). Contudo a peletização necessita de uma etapa a mais para a reciclagem do material, desta forma o uso do polímero na fase líquida como base para verniz é uma tecnologia que deve ser avaliada.

De acordo com Garcia e Robertson (2017) a reciclagem de plásticos é cara e demorada, além de requerer grandes quantidades de energia e muitas vezes levar a polímeros de baixa qualidade. Desta forma a reciclagem química do EPS com solventes terpênicos, em especial com resíduos terpênicos, pode possibilitar uma alternativa que necessita de menor quantidade de energia e possibilitaria a reinserção do EPS no ciclo produtivo como base para verniz e, portanto, motivar as recicladoras a investir na reciclagem de Isopor®.

3.2. AVALIAÇÃO DE DIFERENTES SOLVENTES TERPÊNICOS PARA A DISSOLUÇÃO DE EPS PÓS-CONSUMO

O OEL utilizado neste estudo, por ser 100% natural, tem um custo elevando em relação aos outros solventes avaliados (α-pineno e terebintina) como pode ser observado na Tabela 3. Além destes solventes também foram avaliados dois resíduos terpênicos. Os resíduos foram obtidos em diferentes etapas do processo industrial de produção de solventes naturais e, provavelmente, teriam um custo mínimo de aquisição, porém, o custo de transporte destes resíduos até a unidade de reciclagem deve ser considerado, contudo esta avaliação não foi realizada no presente estudo.

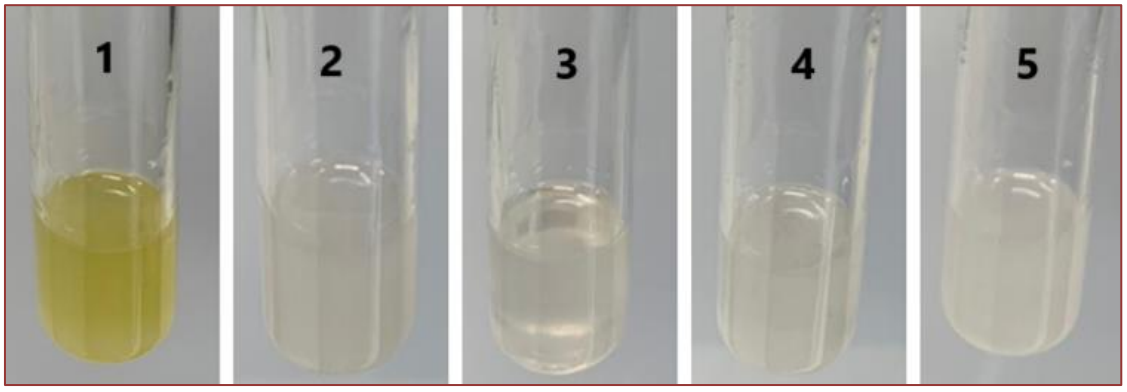
Tabela 3 – Preços dos solventes terpênicos

Solvente	USD/kg
OEL	5,10
-Pineno	3,27
Terebentina	1,54

Fonte: Himalaya (2023).

Para a análise de dissolução do EPS pós-consumo para os solventes avaliados neste estudo (Tabela 1) foi adotada a concentração de 0,25 $g.mL^{-1}$ de EPS de forma a possibilitar a aplicação da resina como verniz, ou seja, pois observou-se nos ensaios com OEL que a viscosidade da resina obtida ficou elevada com 0,5 $g.mL^{-1}$ e baixa com 0,17 0,5 $g.mL^{-1}$. A Figura 3 ilustra as resinas obtidas com os diferentes solventes testados após a etapa de secagem a ~180 °C.

Figura 3 – Resinas obtidas para diferentes solventes terpênicos

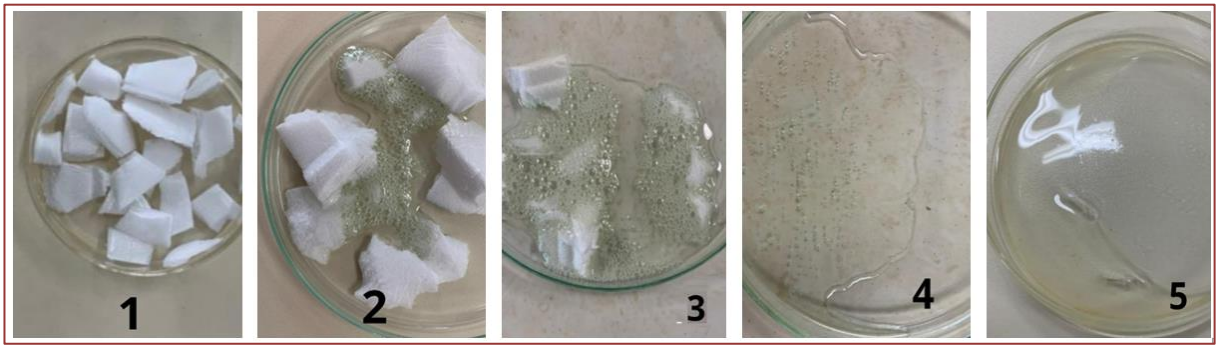


Legenda: 1 – OEL; 2 - Resíduo II; 3 - Resíduo I; 4 - α-Pineno; 5 – Terebentina.
Fonte: As autoras (2023).

A dissolução do EPS pós-consumo ocorreu para os cinco solventes testados, incluindo os resíduos terpênicos, indicando que estes são capazes de dissolver o Isopor® com agitação leve. A velocidade de dissolução foi maior na seguinte sequência: OEL > resíduo I > resíduo II > terebintina > α-pineno. Na Figura 3 observa-se que as resinas obtidas com o uso do α-pineno e da terebintina ficaram mais turvas indicando que a quantidade de solvente (2 mL) não foi suficiente para a dissolução completa do EPS.

Durante os ensaios, observou-se que o processo de dissolução do EPS gera bolhas até a obtenção da mistura homogênea, como pode ser observado na Figura 4, a qual ilustra as etapas do processo de dissolução do EPS pós-consumo.

Figura 4 – Etapas do processo de dissolução do EPS pós-consumo com solventes terpênicos



Legenda: 1- EPS pós-consumo fragmentado; 2 – Inicio do processo de dissolução; 3 – Dissolução incompleta. 4- Presença de bolhas; 5 – Mistura homogênea obtida.
Fonte: As autoras (2023).

A dissolução com menor intensidade de agitação poderá favorecer a aplicação em escala piloto ou industrial pois necessitará de um agitador com menor potência e, consequentemente, com menor consumo de energia. Com relação ao menor tempo de dissolução, isto permitirá o tratamento de uma maior quantidade de EPS pós-consumo por turno de trabalho. Fatores que podem reduzir os custos de operação do processo e, provavelmente, viabilizar economicamente o mesmo.

Quando se analisou os componentes majoritários dos solventes avaliados (Tabela 4) verificou-se que os componentes que melhor dissolveram o EPS pós-consumo foram o *d*-limoneno, *p*-cimeno, β-mirceno e β-pineno.

Tabela 4 – Componentes majoritários dos solventes terpênicos utilizados

Solvente	Componente majoritário
OEL	79,76% de *d*-limoneno 14,50% de β-mirceno 3,11% de β-pineno
Resíduo terpênico I	44,52% de *d*-limoneno 19,52% de *p*-cimeno 14,79% de β-pineno 4,89% de α-terpineno
Resíduo terpênico II	38,80% de *d*-limoneno 19,34% de *p*-cimeno 8,84% de β-mirceno 8,49% α-dihidroterpineol 7,45% de β-pineno 3,28% α-terpineol
Terebintina	63,41% de β-pineno 30,22% de α-pineno
α-pineno	93,20% de α-pineno

Para os solventes que continham α-pineno em sua composição a dissolução do Isopor® foi mais lenta e a resina apresentou maior turbidez. Os bons resultados da dissolução do EPS com o OEL já eram esperados, pois este possuía 79% de *d*-limoneno. Estudos realizados por Silva, Freitas e Rocha. (2021), Silva (2021) e Soeira (2019) mostraram que o *d*-limoneno dissolveu o EPS de forma satisfatória. Ainda, de acordo com Silva (2021) a dissolução do EPS com *d*-limoneno permitiu uma significativa redução no volume - de forma simples - e proporcionou uma resina de qualidade superior. A presença de β-mirceno no OEL e no resíduo II, provavelmente contribuiu com a dissolução do EPS, pois segundo Eggersdorfer (2003) este terpeno é usado como solvente ou agente diluidor para corantes e vernizes.

Porém, por possuir uma quantidade maior de *d*-limoneno e aproximadamente 5% de α-terpineno o resíduo I dissolveu melhor o EPS do que o resíduo II. De acordo com Hattori et al. (2008) apud Silva (2021) o α-terpineno e seus isômeros, devido a posição da ligação C=C, têm alto poder de solvente para o poliestireno.

Além disso, os resíduos I e II possuíam aproximadamente 19% de *p*-cimeno. De acordo com estudo realizados por Gorre Junior e Tumolva (2020), que utilizou o *p*-cimeno como solvente, foi possível a reciclagem de polipropileno e polietileno. Desta forma a presença deste terpeno nos resíduos industriais também pode ter contribuído para a melhor dissolução do EPS em relação a terebintina, o que não era esperado.

Vale salientar, que após uma semana em temperatura ambiente, a resina obtida com o uso do resíduo II solidificou e ocorreu a formação de duas fases imiscíveis, o que dificulta a aplicação da resina como verniz. Para as resinas obtidas com o uso do OEL e resíduo I, após uma semana, também ocorreu a separação de fases, porém ao agitar a suspensão ocorreu a homogeneização, contudo percebeu-se um aumento da viscosidade da resina.

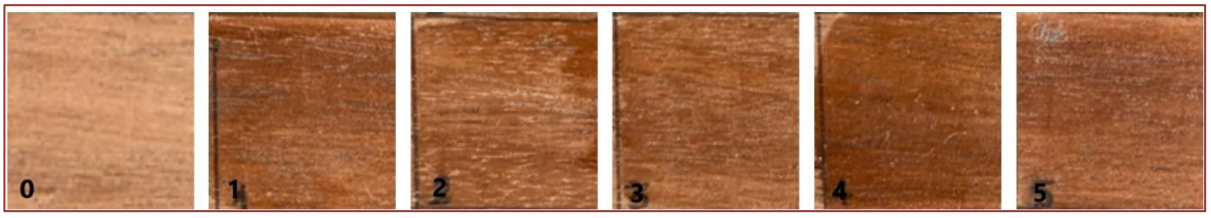
3.3. APLICAÇÃO DA RESINA OBTIDA COMO VERNIZ

De acordo com Soeira (2019), o verniz é uma dispersão coloidal não pigmentada ou uma solução de resinas, ou seja, é constituído por uma mistura de resinas, solvente e aditivos. Desta forma a resina obtida com a dissolução e precipitação do EPS (0,25 $g.mL^{-1}$) pode ser considerada um tipo verniz. Vale salientar que neste estudo não se fez uso de nenhum tipo de aditivo, os quais podem melhorar a qualidade do verniz.

Com relação a aplicação do verniz na madeira observou-se que as resinas obtidas a partir da terebentina e do *α*-pineno apresentaram maior viscosidade e, portanto, a aplicação na madeira foi mais difícil. Em contrapartida, ao se usar o OEL e o resíduo I como solvente as resinas obtidas foram de fácil manuseio e possuíam menor viscosidade. A secagem do verniz foi completa a temperatura e pressão ambiente e o verniz não apresentou aderência ao toque.

A Figura 5 mostra a madeira bruta comparada com o revestimento dado pelos diferentes vernizes obtidos em função do tipo de solvente utilizado para a dissolução do EPS. Foi realizada uma única aplicação do verniz e foi possível observar que ocorreu o recobrimento da madeira de forma satisfatória.

Figura 5 – Recobrimento da madeira após a secagem do verniz



0 – Madeira bruta; 1 – OEL; 2 - Resíduo II; 3 - Resíduo I; 4 - *α*-Pineno; 5 – Terebentina.
Fonte: As autoras (2023).

Após a secagem, os vernizes que apresentaram os melhores resultados em relação ao brilho e a textura formam os obtidos com solventes OEL e resíduo I. O recobrimento da madeira pelo verniz obtido a partir do resíduo II não foi satisfatório, porém isso pode ter ocorrido devido à baixa concentração de EPS na resina. Destaca-se que a resina obtida com o uso de OEL como solvente produziu um verniz levemente amarelado devido a coloração característica do óleo essencial de laranja. Os demais vernizes obtidos eram incolores. A obtenção de um verniz incolor, segundo Soeira (2019) permite a aplicação do mesmo como revestimento decorativo, pois irá proporcionar brilho no material e não alterará a coloração da madeira.

O bom recobrimento da madeira pelo verniz obtido com o uso de OEL – rico em *d*-limomeno – era esperado. De acordo com Soeira (2019) o verniz obtido a partir da dissolução de EPS com *d*-limoneno pode ser utilizado como película protetora em superfícies como a madeira, visto que impedem a absorção de água e umidade e aumentam a durabilidade do material. Outra aplicação para o verniz obtido a partir do Isopor® foi proposta por Jimenez-Francisco et al. (2017). Estes autores também utilizaram o *d*-limoneno como solvente, porém aplicaram o verniz como revestimento em papel Kraft e os resultados mostraram aumento significativo na resistência do papel.

Os resultados obtidos neste estudo, além de confirmaram o uso do *d*-limoneno como um solvente adequado para a dissolução do EPS pós-consumo e aplicação da resina como verniz, mostram o potencial do uso dos resíduos I e II para a mesma finalidade. O uso de resíduos industriais para a dissolução do EPS poderá possibilitar a reinserção tanto do Isopor® como dos resíduos da indústria de solventes naturais na cadeia produtiva, ou seja, os resíduos deixarão de ser enviados para aterros e para estações de tratamento de efluentes industriais, respectivamente.

3.4. OTIMIZAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO EPS PÓS-CONSUMO PARA OBTENÇÃO DE VERNIZ

Nesta etapa do estudo foram avaliados os solventes que apresentaram os melhores resultados para a aplicação da resina como verniz, a saber: OEL, resíduo I e resíduo II. Desta forma variou-se a concentração do EPS (C_{EPS}) no verniz obtido e avaliou-se a facilidade de dissolução do EPS e da aplicação do verniz, bem como a qualidade do recobrimento e a aparência visual (textura e brilho) a madeira após a aplicação do verniz após a secagem em condições ambientais. Os resultados obtidos estão resumidos no Quadro 1.

Vale ressaltar que foram realizados testes com concentração de 0,05 $g.mL^{-1}$ para o OEL. Foi notório que com a redução da concentração de EPS reduziu-se a viscosidade da suspensão e, consequentemente foram obtidas como vantagens a alta velocidade na dissolução, a eliminação da agitação para a dissolução total do EPS e secagem rápida do verniz após a aplicação. Porém, a baixa viscosidade dificultou a aplicação do verniz, devido ao escorrimento, e após a secagem verificou-se que o recobrimento foi uniforme, porém sem brilho e por esta desvantagem a dissolução com os resíduos I e II não foi testada para esta concentração de EPS não foi testada. O uso de aditivos pode aumentar a viscosidade e melhorar a qualidade da resina para a concentração de EPS de 0,05 $g.mL^{-1}$, porém o aumento dos custos deve ser avaliado.

Quadro 1 – Resultados obtidos com o verniz produzido com diferentes solventes e concentrações de EPS

Solvente utilizado	C_{EPS} (g.mL^{-1})	Dissolução do EPS	Aplicação do verniz	Qualidade do recobrimento	Aparência visual	
OEL	1,00	Não ocorreu a dissolução completa, mesmo com agitação. A mistura tinha alta viscosidade e aderência. Apresentou aspecto de cola.	Difícil, devido a alta viscosidade. O verniz não espalhou.	Ruim. Não uniforme.	Com manchas opacas (esbranquiçadas), brilho e textura irregular.	
	0,50	A resina ficou saturado mesmo com agitação.	Fácil.	Muito bom. Uniforme.	Conferiu brilho e textura lisa a madeira.	
	0,25	Dissolução completa, com agitação.	Fácil.	Muito bom. Uniforme.	Conferiu brilho e textura lisa a madeira.	
	0,10	Dissolução completa e rápida, sem agitação.	Fácil, com secagem rápida.	Bom. Uniforme.	Conferiu brilho e textura lisa a madeira.	
Resíduo I	1,00	Não ocorreu a dissolução completa, mesmo com agitação. A mistura ficou heterogênea.	Não foi possível produzir o verniz.			
	0,50	A dissolução do EPS foi completa, porém lenta. Precisou de agitação constante.	Fácil.	Bom. Uniforme.	Conferiu brilho e textura lisa a madeira.	

Fonte: As autoras (2023).

Quadro 1 – Resultados obtidos com o verniz produzido com diferentes solventes e concentrações de EPS (continuação)

Solvente utilizado	C_{EPS} (g.mL^{-1})	Dissolução do EPS	Aplicação do verniz	Qualidade do recobrimento	Aparência visual	
Resíduo I	0,25	A dissolução do EPS foi completa, precisando de pouca agitação. como baixo brilho na aplicação da madeira.	Fácil.	Bom. Uniforme.	Não conferiu brilho a madeira. Textura lisa.	
	0,10	A dissolução do EPS foi completa e muito rápida. Não exigiu agitação.	Difícil, devido à baixa viscosidade. O verniz escorreu. A secagem foi rápida.	Regular. Uniforme. Para um bom resultado seria necessária uma segunda aplicação.	Não conferiu brilho a madeira. Textura irregular.	
Resíduo II	1,00	Não ocorreu a dissolução completa, mesmo com agitação. A mistura ficou heterogênea.	Não foi possível produzir o verniz.			
	0,50	Não ocorreu a dissolução completa, mesmo com agitação.	Difícil, devido a alta viscosidade. O verniz não espalhou bem.	Ruim. Não uniforme.	Com manchas opacas (esbranquiçadas), brilho irregular e textura lisa.	
	0,25	Ocorreu a completa dissolução, porém foi realizada com agitação.	Fácil.	Muito bom. Uniforme.	Conferiu brilho e textura lisa a madeira.	
	0,10	A dissolução foi completa e rápida. Exigiu pouca agitação para a completa dissolução.	Difícil, devido à baixa viscosidade. O verniz escorreu. A secagem foi rápida.	Ruim. Não uniforme.	Não conferiu brilho a madeira deixando-a com coloração esbranquiçada. Textura irregular.	

Fonte: As autoras (2023).

Com relação as demais concentrações de EPS testadas as que proporcionaram um verniz de melhor qualidade foram de 0,5 g.mL^{-1} e 0,25 g.mL^{-1}, exceto quando se usou o resíduo II como solvente. Para este somente a concentração de 0,5 g.mL^{-1} possibilitou um recobrimento da madeira pelo muito bom e similar ao obtido com o uso do OEL. Desta forma para o resíduo II foram realizados ensaios de dissolução com diferentes concentrações de EPS pós-consumo. A marca de Isopor® utilizadas nestes ensaios foi a Copobras (CF066). Também foi avaliado o tempo de dissolução com e sem agitação com ensaios em realizados em triplicata. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Tempo de dissolução para diferentes concentrações de EPS pós-consumo usando o resíduo II como solvente - com e sem agitação.

C_{EPS} (g.mL^{-1})	Tempo de dissolução com agitação (s)	Tempo de dissolução sem agitação (s)
0,50	284 ± 9	2885 ± 41
0,25	149 ± 16	841 ± 5

Fonte: As autoras (2023).

Pela Tabela 5 observa-se que o tempo de dissolução do EPS pós-consumo com o resíduo II sem agitação foi ~10 vezes superior ao com agitação para a concentração de 0,50 g.mL^{-1}. Com o aumento da quantidade de solvente (C_{EPS} = 0,25 g.mL^{-1}) - como esperado - a dissolução sem agitação foi mais efetiva, porém ainda ~6 vezes mais lenta. Estes resultados mostram que a agitação e a concentração de 0,25 g.mL^{-1} são significativamente melhores ($p < 0,05$) para a dissolução do EPS pós-consumo, além de proporcionar um verniz de qualidade superior (Quadro 1).

4. CONCLUSÃO

Todos os solventes terpênicos foram capazes de dissolver o EPS pós-consumo, o que mostra o potencial do uso de solventes naturais e resíduos industriais terpênicos para a reciclagem do Isopor®. Porém o uso da terebintina e do a-pineno como solventes para a diluição do EPS pós-consumo apresentaram uma resina turva e dissolução mais lenta em relação aos demais solventes avaliados. Os melhores resultados foram obtidos com o óleo essencial de laranja e com os resíduos terpênicos da indústria de solventes naturais, com estes a dissolução do EPS foi rápida e se obteve uma resína límpida.

O óleo essencial de laranja (~80% de *d*-limoneno) proporcionou, além da dissolução compelta do EPS, um verniz de qualidade muito boa, ou seja, de fácil aplicação, bom revestimento da madeira e conferindo brilho e textura uniforme à mesma. O uso do resíduo I (~ 44% de *d*-limoneno) favoreceu a dissolução do EPS em relação ao resíduo II (~39% de *d*-limoneno) pois além de possuir uma maios quantidade *d*-limoneno continha de α-terpineno (~5%) o que favoreceu a reciclagem. Em contrapartida o resíduo II, além ne menor quantidade de *d*-limoneno possuia ~12% de álcoois terpênicos, os quais são menos polares que os monoterpenos e dificultam a dissolução do EPS pós-consumo. Porém, a presença dos álcoois no resíduo II, provavelmente proporcionou a obtenção de um verniz de qualidade similar ao obtido com o óleo essencial de laranja quando se utilizou . 0,25 g de EPS por mL de solvente. Com esta concentração o tempo de dissolução do Isopor® foi significativamente inferior (90,60%) quando comparada com a concentração de 0,50 g.mL^{-1}.

O processo de dissolução do EPS pós-consumo ocorre a temperatura ambiente e pode ser realizado sem agitação, neste caso o processo será mais lento, porém evita gastos com o uso de agitadores o que pode motivar as cooperativas e recicladores a investir no processo de reciclagem do Isopor®. Além disso o uso de um resíduo industrial para a dissolução do EPS poderá viabilizar economicamente o processo de reciclagem e ampliar a taxa de reciclagem deste tipo de polímero no Brasil.

AGRADECIMENTOS

À SOCER Brasil Indústria e Comércio LTDA pelo fornecimento dos solventes para a realização do estudo, bem como a execução das análises cromatográficas dos mesmos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de auxílio financeiro para a aluna do Programa de Iniciação Científica e Tecnológica (PIBIC) da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

REFERÊNCIAS

[1] ABRAPEX - A importância do EPS para a indústria brasileira. 9/11/2021. ABRAPEX. Disponível em: http://abrapex.com.br/a-importancia-do-eps-para-a-industria-brasileira/. Acessado em: 31/10/2023.

[2] BATISTA, M. G. F.; KOLICHESKI, M. B.; FIORANI, J. M.; CORAZZA, M. L.; VOLL, F. A. P. Ponkan essential oil from peels and agro-industrial waste of Citrus reticulata Blanco. Journal of Essential Oil and Plant Composition. v. 1 i. 3 p. 220-227, 2023. doi: 10.58985/jeopc.2023.v01i03.28

[3] CELLA, R. F. **Reciclagem de espumas semi-rígidas de poliestireno pela dissolução em terpenos e secagem em secador de tambor**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

[4] CONNOR, N. **What is Expanded Polystyrene – EPS – Definition**. 22/05/2019. Thermal Engineering. Disponível em: www.thermal-engineering.org/what-is-expanded-polystyrene-eps-definition/. Acessado em: 30/10/2023.

[5] EPS Brasil. **Mercado | Poliestireno Expansível**. Comissão Setorial ABQUIM. Disponível em: www.epsbrasil.eco.br/mercado.html. Acessado em: 31/10/2023.

[6] EGGERSDORFER, M. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2003.

[7] FELIPE, L. O.; BICAS, J. L. Terpenos, aromas e a química dos compostos naturais. **Química Nova na Escola**, [S.L.], v. 39, n. 2, p. 120-130, maio 2017. Sociedade Brasileira de Quimica (SBQ). doi: 10.21577/0104-8899.20160068.

[8] GARCÍA, M. T.; DUQUE, G.; GRACIA, I.; LUCAS, A.; RODRIGUEZ, J. F. Recycling extruded polystyrene by dissolution with suitable solvents. **Journal of Material Cycles and Waste Management**. v. 11, p. 2-5. 2009. doi: 10.1007/s10163-008-0210-8

[9] GARCIA, M. J.; ROBERTSON, M.L. The future of plastics recycling: Chemical advances are increasing the proportion of polymer waste that can be recycled. **Science**. v. 358, p. 870- 872, 2017. doi: 10.1126/science.aaq0324

[10] GORRE JUNIOR, R. C.; TUMOLVA, T. P. Solvent and non-solvent selection for the chemical recycling of waste Polyethylene (PE) and Polypropylene (PP) metallized film packaging materials. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science** 463, 2020 doi:10.1088/1755-1315/463/1/012070

[11] HIMALAYA. Pine Oil and Turpentine derivatives Manufacturer. **Himalaya Terpenes Pvt. Ltd**. Disponível em: https://www.himalayaterpenes.com/ Acessado em: 08/11/2023.

[12] ISORECORT. GRUPO ISORECORT. **Conheça as vantagens de reciclar o Poliestireno Expandido (EPS).** 2023. Disponível em: www.isorecort.com.br/conheca-as-vantagens-de-reciclar-o-poliestireno-

expandido-eps/ Acessado em: 08/11/2023.

[13] JIMENEZ-FRANCISCO, M.; CAAMAL-CANCHE, J. A.; CARRILO, J. G.; CRUZ-ESTRADA, R. H. Performance Assessment of a Composite Material Based on Kraft Paper and a Resin Formulated with Expanded Polystyrene Waste: A Case Study from Mexico. **Journal Polymer Environment**, v.36, p.1573-1580, 2018. doi: 10.1007/s10924-017-1073-7

[14] KERBER, J. C. **Estudo prévio para implantação de pontos de entrega voluntária de poliestireno expandido em Florianópolis - SC**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

[15] KNAUF. **Knauf Isopor®: Comprometimento com um Brasil sustentável**. 2018. Knauf industries. Disponível em: www.knauf-isopor.com.br/corporativo/sustentabilidade/?cn-reloaded=1 Acessado em: 08/11/2023.

[16] MARÓSTICA JÚNIOR, Mário Roberto; PASTORE, Gláucia Maria. Biotransformação de limoneno: uma revisão das principais rotas metabólicas. **Química Nova**, [S.L.], v. 30, n. 2, p. 382-387, abr. 2007. FapUNIFESP. doi: 10.1590/s0100-40422007000200027.

[17] MEIWA. MEIWA Embalagens. **Relatório de sustentabilidade 2022-2023**. Disponível em: www.meiwa.com.br/wp-content/uploads/2023/07/Relatorio-de-Sustentabilidade-Meiwa-20222023.pdf Acessado em: 08/11/2023.

[18] PAGLIARO, M.; TIXIER, A. S. F.; CIRIMINNA, R. Limonene as a natural product extraction solvente. **Green Chemistry**. v. 25. p. 6108–6119, 2023. doi: 10.1039/D3GC02068A

[19] PIRES, T. C. M.; RIBEIRO, M. G. T. C.; MACHADO, A. A. S. C. Extração do r-(+)-limoneno a partir das cascas de laranja: avaliação e otimização da verdura dos processos de extração tradicionais. **Química Nova**. v. 41. n. 3. 355-365, 2018.

[20] SILVA, J. C., FREITAS, G. V., ROCHA, J. V. S. S. **Dissolução do poliestireno expandido com o solvente d-limoneno**. Universidade UNIFACEAR, 2021.

[21] SILVA, M. F. B. **Estudo de técnicas de reciclagem do Poliestireno Expandido: Uma revisão sistemática e uma proposta de reaproveitamento.** Dissertação (mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental). Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2021.

[22] SOEIRA, A. P. R. **Reciclagem de poliestireno expandido utilizando o solvente natural d-limoneno para produção de verniz e tinta**. 2019. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Centro Universitário FACVEST – UNIFACVEST, Lages, 2019.

[23] SOUZA, A. C. M.; MIRABELLO JUNIOR, L. O.; MORAIS, L. A.; CESAR, L. K. F. A logística reversa do isopor. **X FATECLOG - Logística 4.0 & A sociedade do conhecimento**. 2019. Anais. FATEC, 2019.

[24] TESSARI, J. **Utilização de Poliestireno Expandido e Potencial de Aproveitamento de seus Resíduos pela Construção Civil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006

[25] ZARDO, N., SCHUCK, K., SÁ, E.M.F., WAGNER, R., ALVES, C. Estudo da composição química e do poder de dissolução dos óleos essenciais de anis-estrelado (Illicium verum) e cravo da índia (Syzygium aromaticum) para reciclagem do isopor). **XII Mostra Nacional de Iniciação Científica e Tecnológica Interdisciplinar,** Anais, IFC, 2019.

[26] YERMAKOVA, A.; CHIBIRYAEV, A. M.; KOZHEVNIKOV, I. V.; MIKENIN, P. E.; ANIKEEV, V. I. Thermal isomerization of □-pinene in supercritical ethanol. **Chemical Engineerng**. v. 62. p. 2414-2421, 2007. doi: 10.1016/j.ces.2007.01.041.

Capítulo 12

Otimização estrutural de escadas de concreto armado

Keitson Jales de Medeiros
João Victor da Silva Oliveira
Eduardo Morais de Medeiros

Resumo: Observa-se que o maior desafio, durante o desenvolvimento dos projetos estruturais, para um engenheiro civil seja unir qualidade com um menor custo em um projeto de estruturas, escadas, pilares, lajes ou vigas. Em relação as escadas, estas partem de um processo de dimensionamento onde as cargas presentes nos trechos, retos e inclinados, dependem de variáveis geométricas, dentre elas a pisada e o espelho são as que mais impactam. Diante do que foi exposto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma planilha de Excel com a finalidade de otimizar as dimensões de uma escada de concreto armado de lances paralelos com um patamar intermediário. Os resultados obtidos utilizando a ferramenta em questão mostram que a mesma pode ser um grande auxílio no dimensionamento de escadas, quando estas atenderem aos requisitos mínimos definidos por norma.

Palavras-chave: Excel, escadas, otimização, NBR, dimensionamento.

1. INTRODUÇÃO

Algo que é perceptível hoje em dia, no mercado da engenharia civil, é que cada vez mais busca-se formas de empregar o uso de tecnologias no mesmo, com o intuito dessas tecnologias darem aos projetistas formas de execução de peças que tragam economias aos usuários, não deixando de lado a segurança dos mesmos.

Como consequência do aumento da competitividade na construção civil, cresce a filosofia de que os projetos estruturais devem aliar eficiência, segurança e economia no dimensionamento de um elemento estrutural. Desta forma, é necessário que arquitetos, engenheiros e demais profissionais envolvidos no projeto de uma edificação, façam escolhas considerando a viabilidade técnica e financeira da estrutura em questão. Inseridas nesse contexto de elaboração de projetos, estão as escadas de concreto armado. Cunha e Souza (1998, p. 299) salientam que "As escadas têm como função unir, através de degraus sucessivos, os diferentes pavimentos de uma construção." (GELAIN, 2016).

Uma escada de concreto armado requer um projeto estrutural, onde este deve ser feito de acordo com as normas vigentes, onde limite os deslocamentos sob a mesma e, que ainda, garanta a esta uma vida útil compatível com o restante da edificação onde está esteja empregada.

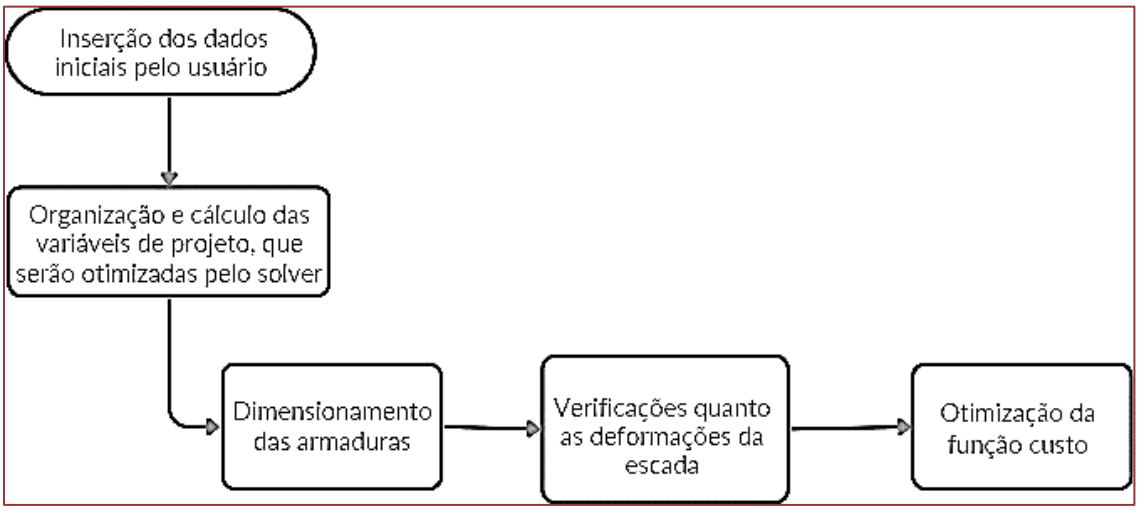
A otimização pode ser descrita como o ato de obter o melhor resultado para determinadas circunstâncias, assim como a otimização aplicada em problemas de engenharia civil que busca a obtenção da solução mais vantajosa. Essa tarefa cabe ao projetista e implica uma pesquisa exaustiva que o obrigaria levar em consideração todas as soluções possíveis. Para isso é necessário que as soluções possíveis sejam finitas e que sua análise possa ser efetuada em um intervalo de tempo razoável. (VALENTE, 2020).

Assim, esse trabalho tem como intuito demonstrar a aplicação de uma ferramenta desenvolvida com o propósito de dimensionar, quando possível, uma escada de concreto armado, com dois lances paralelos e um patamar intermediário, de forma que esta tenha o menor custo possível, ou seja, a solução ótima, tanto de concreto como de aço, mas que a mesma esteja de acordo com as normas vigentes, que todos os seus parâmetros estejam dentro dos limites estabelecidos.

2. METODOLOGIA

Na Figura 1 pode-se observar o fluxograma de etapas que a ferramenta segue para obter o melhor resultado.

Figura 1 - Fluxograma das etapas do modelo de cálculo



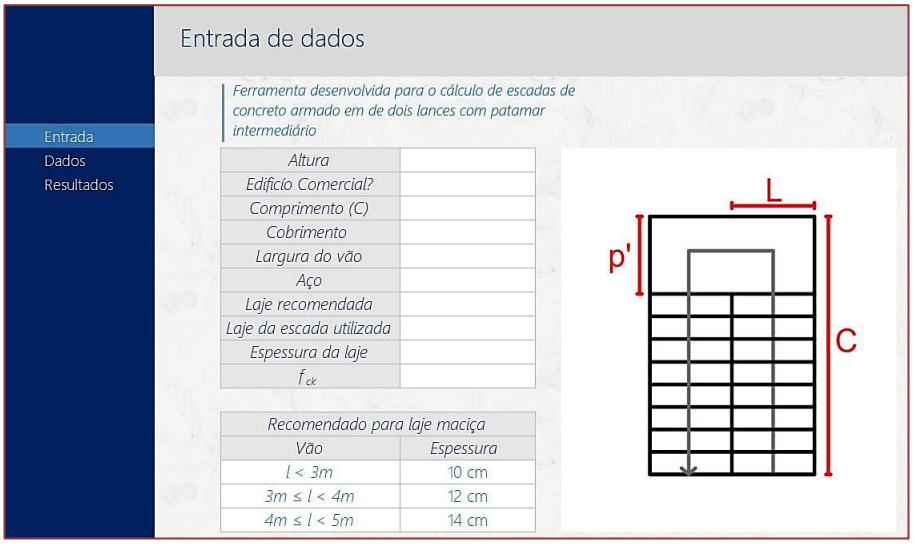
Fonte: Autor, 2023.

Dito isso para o funcionamento da mesma devem ser informados, como dados de entrada, os seguintes parâmetros pelo usuário:

- A altura entre pisos da edificação;
- Se a edificação é um edifício comercial ou não;
- O comprimento horizontal disponível para a construção da mesma;
- O cobrimento das armaduras que varia de acordo com a classe de agressividade ambiental da região;
- A largura de cada vão de escadas;
- O tipo de aço que será utilizado na mesma;
- O tipo de laje que será utilizada como base para a escada, se será maciça ou treliçada, onde a ferramenta já recomenda qual tipo utilizar;
- A espessura dessa laje, que também é recomendada pela ferramenta, mas o usuário tem total liberdade de escolher outro valor que achar pertinente e o *fck* do concreto.

Na Figura 2 pode ser observado a parte de entrada de dados da ferramenta:

Figura 2 - Entrada de dados da ferramenta computacional



Fonte: Autor, 2023.

Com relação ao custo dos materiais, existe uma aba na planilha desenvolvida que contém valores de referência, onde estes foram extraídos da tabela SINAPI com referência 04/2023 e podem ser alterados pelo usuário, como também outros parâmetros que serão utilizados no procedimento de dimensionamento da escada.

2.1.ORGANIZAÇÃO E CÁLCULO DAS VARIÁVEIS DE PROJETO

Após o usuário inserir os dados de entrada pedidos a ferramenta os organiza de uma forma a facilitar os cálculos. Dessa forma a mesma também calcula quantos degraus por lance serão necessários para se vencer a altura informada, para isso a mesma usa metade desse valor dividido por 18cm, que é a maior altura permitida para um espelho de uma escada.

Após isso são separadas as variáveis geométricas em variáveis de projeto (espelho, pisada e bitola da barra de aço), que são as variáveis a serem otimizadas no procedimento de cálculo. As variáveis de estados (espessura da laje, cosseno do ângulo de inclinação da escada, $h1$, hm, o comprimento do patamar, e o fck do concreto), que dependem das variáveis de projeto. Para obtenção do comprimento do patamar intermediário foi utilizado um critério onde o patamar só poderia ser de no máximo 1 metro e no mínimo de 80cm, para atender a NBR 9050, onde o valor do patamar é obtido através do comprimento máximo disponível subtraído do espaço que a escada em projeção horizontal ocupa.

As variáveis de projeto foram organizadas de duas formas: variáveis de projeto contínuas x_1 (que corresponde ao valor do espelho obtido pelo solver), x_2 (que corresponde ao valor da pisada), x_3 (que de maneira análoga as demais representa a bitola da barra de aço determinada pelo solver), onde estão são as buscadas pelo solver, e as discretas: o espelho (e), a pisada (P) e a bitola da barra de aço (φ). Para a variável de projeto correspondente a bitola foi utilizada uma função do próprio software o "*=PROCV...*" para retornar o valor escolhido pelo solver em um intervalor de números

inteiros estabelecido, onde este valor retornará o valor correspondente nas variáveis de projeto discretas que será utilizado para os demais cálculos de dimensionamento.

As demais variáveis geométricas, que dependem das variáveis de projeto, como foi dito anteriormente, são obtidas a partir das equações 1,2 e 3:

Equação 1

$$\cos(\theta) = \frac{P}{\sqrt{P^2 + e^2}}$$

Equação 2

$$h_1 = \frac{h}{\cos(\theta)}$$

Equação 3

$$h_m = h_1 + \frac{e}{2}$$

Onde:

Cos(θ) = cosseno do ângulo de inclinação da escada;

P = pisada da escada, em cm;

e = espelho da escada, em cm;

h_1 = espessura da laje medida na direção vertical, em cm;

h = espessura da laje utilizada na escada. em cm;

h_m = espessura média na direção vertical medida na metade do degrau, em cm;

Para a obtenção do comprimento do patamar foi utilizado a equação 4:

Equação 4

$$P' = C - (n * P)$$

Sendo que:

P' = comprimento do patamar; em m;

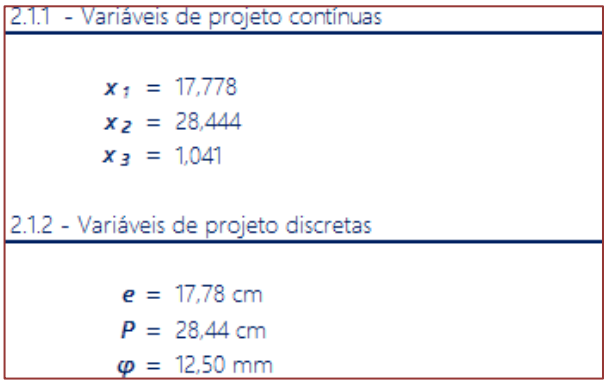
C = comprimento do vão livre; em m;

n = número de degraus por lance;

P = pisada da escada; em m.

Destaca-se que o valor obtido era inferior a 0,80m era adotado como 0,80m, e quando superior a 1m era utilizado o valor de 1m. Esses valores foram adotados para garantir um tamanho suficiente para o patamar, de forma a não ocupar uma grande largura horizontal, nem prejudicar a circulação de pessoas. Na figura 3 podem ser observadas como estão organizadas as variáveis de projeto na ferramenta:

Figura 3 - Variáveis de projeto



Fonte: Autor, 2023.

2.2. DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS

Obtidas todas as variáveis geométricas da escada a ferramenta parte para a obtenção das cargas no trecho inclinada da escada e no patamar, onde estas são: o peso próprio (*PP*), a carga oriunda do revestimento (*RV*) e uma carga acidental (*CA*) indicada por normal, que varia pelo tipo de função da edificação. Para obtenção do peso próprio foi utilizado de duas equações, uma para o trecho inclinado e outra para o trecho reto como pode ser visto nas equações 5 e 6 a seguir, respectivamente:

Equação 5

$$\boldsymbol{PP = \gamma_c * h_m}$$

Assim:

PP = peso próprio, em kN/m^2;

γ_c = peso específico do concreto, 25kN/m^3;

h_m = espessura média na direção vertical medida na metade do degrau, em m.

Equação 6

$$\boldsymbol{PP = \gamma_c * h}$$

Tendo:

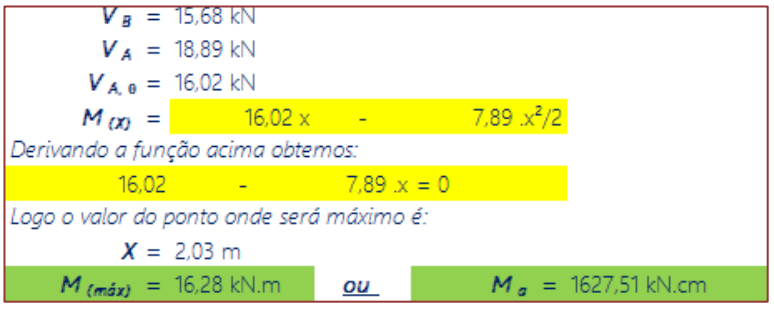
PP = peso próprio, em kN/m^2;

γ_c = peso específico do concreto, 25kN/m^3;

h = espessura da laje utilizada na escada. em m.

De posse dos valores dos carregamentos a planilha calcula o momento máximo presente na escada, este é obtido com base na reação do apoio do início da escada, que também é determinado pela mesma. Com esse valor da reação do apoio é obtida uma equação do 2º grau onde a mesma é derivada e obtida a equação da cortante, onde desta é obtida o valor da posição onde este terá o momento máximo, após substituído o valor na equação do 2º grau obtida anteriormente. Pode ser observado na figura 4 essa parte do roteiro de cálculo referente ao momento máximo:

Figura 4 – Cálculo do momento máximo



Fonte: Autor, 2023.

Obtido o valor do momento fletor máximo parte para o cálculo da área de aço da armadura principal para a escada. Para isso a ferramenta determina o valor da área útil (d) e a posição da linha neutra (x), onde estes valores podem ser obtidos pelas equações 7 e 8 a seguir:

Equação 7

$$x = (1,25 * d) * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{M_d}{0,425 * f_{cd} * b_w}}\right)$$

Equação 8

$$d = h - c - \frac{\emptyset}{2}$$

Onde:

x = posição da linha neutra; em cm;

d = altura útil, em cm;

M_d = momento de cálculo, em kNcm;

f_{cd} = resistência de cálculo à compressão do concreto; em kN/cm^2;

b_w = largura da seção de um lance da escada; em cm;

h = espessura da laje utilizada na escada. em cm; c = cobrimento das armaduras, em cm;

Ø = diâmetro da bitola da barra de aço; em cm;

De posse de todos esses valores é determinada a área de aço, o espaçamento entre elas e o número total de barras, esse valor também é comparado com o valor da área de aço mínima. Após isso é determinado a área de aço da armadura de distribuição, com o espaçamento das barras e a quantidade de barras, mas agora em uma faixa por metro. As equações 9 e 10 a seguir referem-se a área de aço e área de aço mínima, respectivamente:

Equação 9

$$A_s = \frac{0,68 * f_{cd} * b_w * x}{f_{yd}}$$

Equação 10

$$A_{s,min} = p_{min} * h * 100$$

Logo:

As = área de aço da seção, em cm^2;

f^{cd} = resistência de cálculo à compressão do concreto; em kN/cm^2;

b^w = largura da seção de um lance da escada; em cm;

x = posição da linha neutra; em cm;

f_{yd} = resistência de cálculo ao escoamento do aço, em kN/cm^2;

$\rho_{mín}$ = taxa de armadura mínima de acordo com o *fck*;

h = espessura da laje utilizada na escada. em cm.

2.3. VERIFICAÇÃO QUANTO AS DEFORMAÇÕES DA ESCADA

Feitos os cálculos de dimensionamento, iniciam-se as verificações, onde estas são utilizadas posteriormente como condições a serem inseridas no *Solver* para otimizar as variáveis de projeto continuas, atendendo aos limites estabelecidos.

Para isso é utilizado como base a deformação limite mostrado na tabela 13.3 da NBR 6118, onde está é definida pela razão *l/250*, onde *l* é a soma da projeção horizonta da parte inclinada da escada com o comprimento do patamar.

Diante deste fato é preciso calcular o quanto a escada deformará, ou seja, é preciso determinar o valor da flecha imediata e o valor da flecha deferida ao longo do tempo, para que a ferramenta esteja de acordo com o item 17.3.2 da NBR 6118. Dessa forma é preciso antes determinar em que estádio a peça de concreto esta, logo é preciso encontrar o valor do momento de fissuração e compará-lo ao momento máximo encontrado durante o processo de dimensionamento da mesma. Nas equações 11, 12, 13 e 14 estão listas as equações necessárias para determinar o valor do momento de fissuração:

Equação 11

$$M_r = \frac{a * f_{ct} * I_c}{y_t}$$

Equação 12

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3}$$

Equação 13

$$I_c = \frac{bh^3}{12}$$

Equação 14

$$y_t = \frac{h_m}{2}$$

Sendo que:

M_r = momento de fissuração;

α = fator que correlaciona de forma aproximada a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta, 1,5 para seções retangulares;

f_{ct} = resistência à tração direta do concreto;

I_c = momento de inércia da seção bruta de concreto;

y_t = distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada;

$f_{ct,m}$ = resistência média à tração do concreto;

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto;

b = largura da seção transversal;

h = altura da seção transversal.

Caso o momento máximo encontrado seja maior que o momento de fissuração então a peça está no estádio de deformação II, logo é necessário calcular o valor do momento de inercia no estádio II, para posterior cálculo da rigidez equivalente. Para isso é preciso, inicialmente, determinar o valor da posição da linha neutra no estádio II, para isso foi utilizada a equação 15 a seguir:

Equação 15

$$x_{II}^2 + \frac{2 * A_s * a_e * x_{II}}{b} - \frac{2 * A_s * d * a_e}{b} = 0$$

Tendo em vista que:

x_{II} = posição da linha neutra no estádio II;

A_s = área de aço tracionada proveniente do dimensionamento;

α_e = relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto;

b = largura da seção;

d = altura útil da seção.

Como se trata de uma equação do 2º grau, serão obtidas duas raízes, onde a raiz negativa será descartada. As equações 16, 17, 18 e 19, listadas a seguir, foram utilizadas para obter o valor de α_e:

Equação 16

$$a_e = \frac{E_s}{E_{cs}}$$

Equação 17

$$E_{cs} = a_i * E_{ci}$$

Equação18

$$a_i = 0,8 + 0,2 * \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0$$

Equação 19

$$E_{ci} = 1,2 * 5600 * \sqrt{f_{ck}}$$

Assim:

E_s = módulo de elasticidade do aço;

E_{cs} = módulo de elasticidade secante do concreto;

α_i = coeficiente de ponderação;

E_{ci} = módulo de elasticidade inicial do concreto;

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto.

Definida a posição da linha neutra no estádio II, o próximo passo é calcular o valor do momento de inércia no estádio II, onde este está descrito na equação 20 a seguir:

Equação 20

$$\boldsymbol{I_{II} = \frac{b * x_{II}^3}{3} + a_e * A_s * (d - x_{II})^2}$$

Logo:

I_{II} = momento de inércia no estádio II;

b = largura da seção;

x_{II} = posição da linha neutra no estádio II;

α_e = relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto;

A_s = área de aço;

d = altura útil da seção.

Antes de ser realizados o cálculo do fecha imediata, deve-se realizar o cálculo da rigidez equivalente na peça. Para isso foi utilizado da equação 21 a seguir mostrada no item 17.3.2.1.1 da NBR 6118:

Equação 21

$$\boldsymbol{(EI)eq,t0 = \left\{\left(\frac{M_r}{M_{máx}}\right)^3 * I_C + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_{máx}}\right)^3 * I_{II}\right]\right\} \leq E_{cs} I_c}$$

Onde:

$(EI)_{eq,t0}$ = rigidez equivalente no tempo zero;

E_{cs} = módulo de elasticidade secante do concreto;

M_r = momento de fissuração da escada;

$M_{máx}$ = momento máximo da escada;

I_c = momento de inércia da seção bruta de concreto;

I_{II} = momento de inércia da seção fissurada no estádio II.

Para o caso onde o momento máximo obtido seja inferior ao momento de fissuração, a escada está no estádio II, logo o valor de *(EI)eq,t0* será igual ao valor de *EI*, isso pode ser observado utilizando a equação 21.

Após realizado a análise e obtido o valor de *(EI)eq,t0*, pode-se calcular o valor da flecha imediata que será desenvolvida na escada, a mesma está descrita na equação 22 a seguir:

Equação 22

$$f_{(t=0)} = \frac{5 * q * l^4}{384 * (EI)eq, t0}$$

Como:

$f_{(t=0)dist}$ = flecha imediata de um carregamento distribuído;

q = carregamento distribuído, obtido pela combinação quase permanente;

l = distância entre os eixos dos apoios da escada, ou seja, a projeção horizontal de todo lance da escada, considerando o patamar;

EI = rigidez equivalente.

Calculado o valor da flecha imediata ($f(t=0)$), obtém-se o valor da flecha deferida ao longo do tempo. Para isso, foram utilizadas as equações 23 a 25:

Equação 23

$$f_{(t=\infty)} = f_{(t=0)} * a_f$$

Equação 24

$$a_f = \frac{\triangle \xi}{1 + 50_p}$$

Equação 25

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0)$$

Onde:

$f_{(t=\infty)}$ = flecha diferida ao longo do tempo;

$f_{(t=0)}$ = flecha imediata;

α_f = fator adimensional;

Δ_ξ = coeficiente em função do tempo;

ρ' = taxa de armadura comprimida.

$\xi_{(t)}$ = valor do coeficiente no tempo em que se deseja estimar o valor da flecha diferida;

$\xi_{(t0)}$ = valor do coeficiente no tempo em que foi aplicada a carga de longa duração.

Os valores desses coeficientes no tempo podem ser observados na Tabela 1, presentes no item 17.3 da NBR 6118:

Tabela 1 – Valores do coeficiente ξ.

Tempo (*t*) meses	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40	≥70
Coeficiente *ξ(t)*	0	0,54	0,68	0,84	0,95	1,04	1,12	1,36	1,64	1,89	2

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

Com os valores da flecha imediata ($f_{(t=0)}$) e da flecha deferida ao longo do tempo ($f_{(t=\infty)}$), devemos somar os dois e se caso o valor obtido for menor que a deformação limite encontrada pela razão *l/250* então o processo de dimensionamento está correto.

Com isso todo o processo de cálculo e de verificação foi concluído e a ferramenta agora prosseguirá para o cálculo do volume de concreto e do custo de concreto e de aço para a escada, como vai ser mostrado mais a diante.

2.4. UTILIZAÇÃO DO SOLVER PARA OTIMIZAR A FUNÇÃO CUSTO

O principal objetivo deste trabalho foi utilizar a ferramenta *Solver* do *software* Microsoft Excel para encontrar e otimizar, o menor custo de uma escada, tendo em vista o menor custo com o volume do concreto utilizado e o menor custo de aço, armadura principal (*As*) e armadura de distribuição ($A_{s,dist}$). Na Figura 5 a seguir pode ser observada a parte do roteiro de cálculo referente a função custo:

Figura 5 - Aplicação da ferramenta para obtenção do custo total

8 - FUNÇÃO CUSTO		
V_{conc} =	1,24 m³	
Custo =	R$	328,38
$Custo_{As}$ =	R$	16,90
$Custo_{As,dist}$ =	R$	10,41
Custo Total	R$	355,69

Fonte: Autor, 2023.

Para o cálculo do volume de concreto foi utilizado da equação 26 a seguir:

Equação 26

$$\boldsymbol{V_{conc} = b \cdot \left((P * n) + P'\right) * h_m}$$

Tendo:

V_{conc} = Volume de concreto total;

b = largura do vão;

P = pisada da escada;

n = número de degraus;

P' = comprimento do patamar intermediário;

h_m = espessura média na direção vertical medida na metade do degrau.

São adicionados a ferramenta solver algumas condições necessárias para que a mesma retorne valores aceitáveis durante o dimensionamento da escada. Tais condições para o dimensionamento adequado da escada têm como base as verificações quanto a deformação máxima da escada, como também, algumas condições geométricas.

2.5. RESTRIÇÕES IMPOSTAS AO SOLVER PARA O DIMENSIONAMENTO

O *solver* irá alterar as variáveis de projeto contínuas (x_1, x_2 e x_3), onde estas são organizadas em variáveis de projeto discretas, de forma a encontrar os melhores valores para o espelho, a pisada e a bitola das barras de aço, respectivamente. Para isso deve ser adicionado ao mesmo algumas restrições de forma que os valores retornados ao usuário sejam valores aceitáveis, e que a escada dimensionada esteja de acordo com os critérios de dimensionamento.

Para a realização desse trabalho foram impostas as seguintes restrições ao *solver*:

2.5.1. RESTRIÇÕES QUANTO AS VARIÁVEIS DE PROJETO

Como foi dito anteriormente as variáveis de projeto continuas são posteriormente organizadas em variáveis de projeto discretas. Para isso foram adicionas as seguintes restrições:

- Para x_1 que corresponde ao espelho da escada (e), foi colocado uma restrição onde este deveria estar entre seguinte intervalo: 16cm ≤ $x1$ ≤ 18cm;
- Para x_2 que corresponde a pisada da escada (P), foi dito que este deveria estar entre o seguinte intervalo: 28cm ≤ x_2 ≤ 32cm;
- Para x_3 que corresponde a bitola da barra de aço (φ), aqui o valor estar entre o intervalo de 1 a 5, e corresponde agora a bitola, que também será o valor retornado mais a frente;
- Blondel: os valores da pisada e espelho devem atender a equação 27:

Equação 27

$$\mathbf{2}_{\boldsymbol{e}} + \boldsymbol{P} = \mathbf{64}\boldsymbol{cm}$$

- Comprimento máximo: o número de degraus vezes o valor da pisada deve ser inferior ou igual ao comprimento máximo disponível para execução da escada;
- Altura do patamar: o patamar intermediário da escada deve estar localizado na metade do vão a ser vencido de forma que o número de degraus vezes o valor do espelho seja igual a metade da altura a ser vencida;
- O espaçamento entre as barras de aço da armadura da escada deve ser inferior ou igual a 20cm;
- O comprimento do patamar (P') intermediário da escada deve atender a seguinte condição: 0,80m ≤ P' ≤ 1,00m.

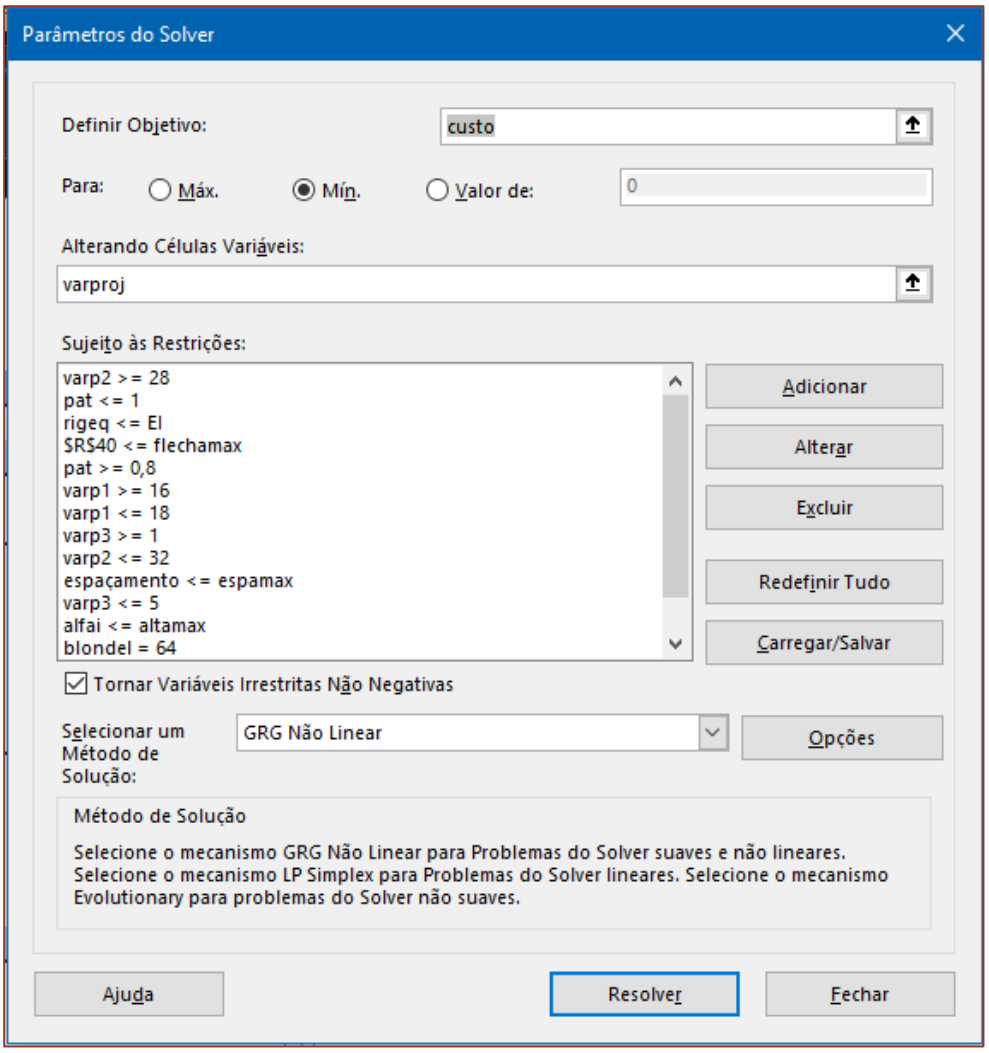
2.5.2. RESTRIÇÕES QUANTO AS DEFORMAÇÕES

- O valor de α_i, onde este está descrito na equação 18, deve ser menor ou igual a 1;
- A rigidez equivalente encontrada ($(EI)_{eq,t0}$), equação 21, deve ser menor ou igual ao valor de EI, de forma a atender os critérios da norma;
- A deformação máxima da escada deve ser menor ou igual a deformação limite daquela peça.

2.6. SOLVER E RESULTADOS RETORNADOS AO USUÁRIO

Na figura 6 podem ser observadas as condições imposta para o desenvolvimento desse trabalho, na tela da ferramenta solver:

Figura 6 - Ferramenta Solver



Fonte: Autor, 2023.

Vale ressaltar aqui que existem casos onde a ferramenta não irá conseguir obter uma solução para o problema apresentado a mesma. Isso ocorre, muitas vezes, por a peça estrutural apresentar uma deformação além do limite, onde , muits vezes, faz-se necessário a alteração de alguns dados por parte do projetista.

Os principais valores obtidos durante o dimensionamento são retornados para o usuário na aba “Resultados” onde o mesmo é levado após dar o comando de calcular. Os dados retornados para o usuário podem ser observados na Figura 7 a seguir:

Figura 7 - Tela dos resultados

Fonte: Autor, 2023.

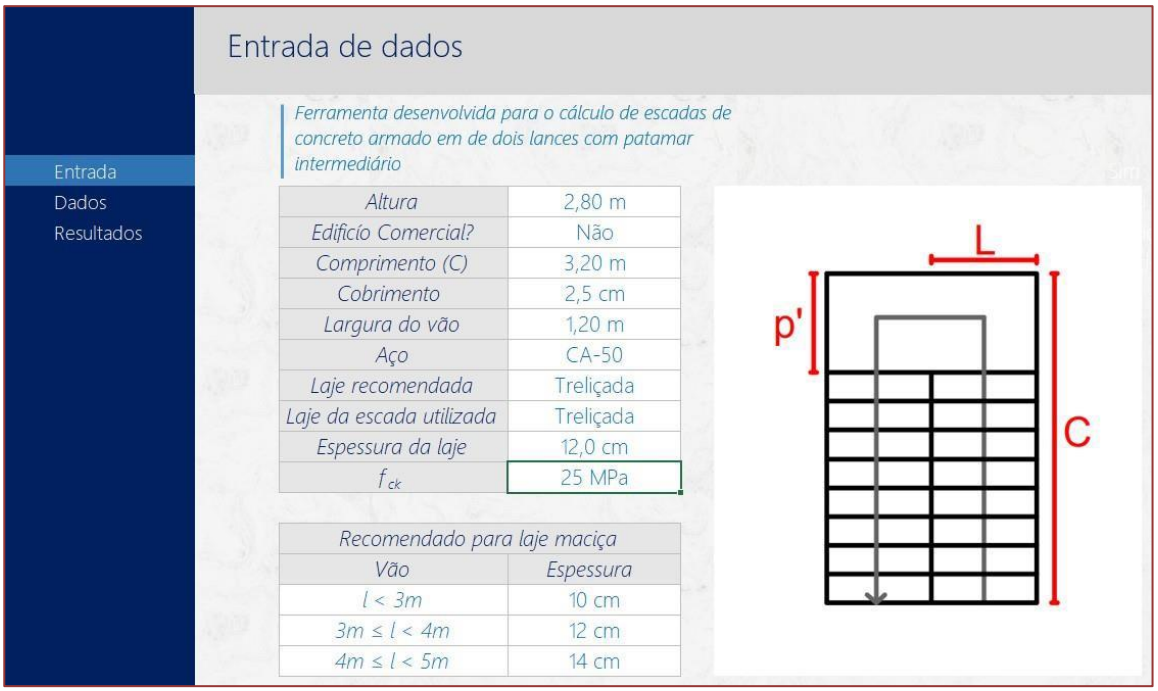
3. RESULTADOS

Para demonstrar o funcionamento da planilha desenvolvida neste trabalho, será utilizado de dois exemplos, onde em um deles será utilizado de uma edificação residencial, e outro para um edifico de uso comercial, onde será dimensionada uma escada com dois lances paralelos com um patamar intermediário.

Para a edificação residencial foi dimensionada uma escada para vencer uma diferença de altura de 2,80m, com cada lance com 1,20m de comprimento, para o posicionamento da mesma existe um comprimento de 3,20m disponível.

Para a resolução desse problema foi adotado o uso do aço CA-50 e um cobrimento de 2,5cm. Na Figura 8 abaixo pode ser observada a tela dos dados de entrada do problema.

Figura 8 - Entrada de dados do problema analisado

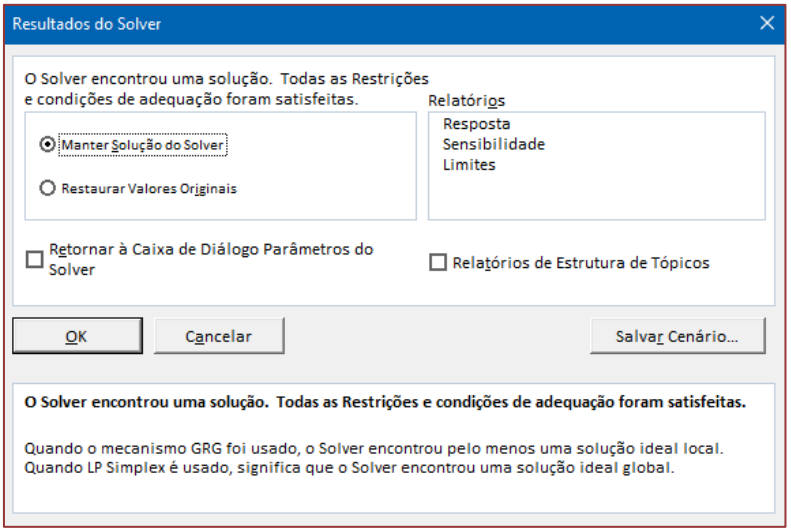


Fonte: Autor, 2023.

Ao inserir os dados iniciais a ferramenta recomenda o uso de 8 degraus a cada lance de escada, de forma que o patamar se situe na metade da altura a ser vencida, ou seja, a 1,40m.

Ao executar a ferramenta *solver* na aba de dados do Excel, o mesmo retornou a seguinte mensagem, presente na Figura 9, avisando que foi possível encontrar um resultado para aquelas variáveis inseridas pelo usuário anteriormente:

Figura 9 - Resultados do *Solver*

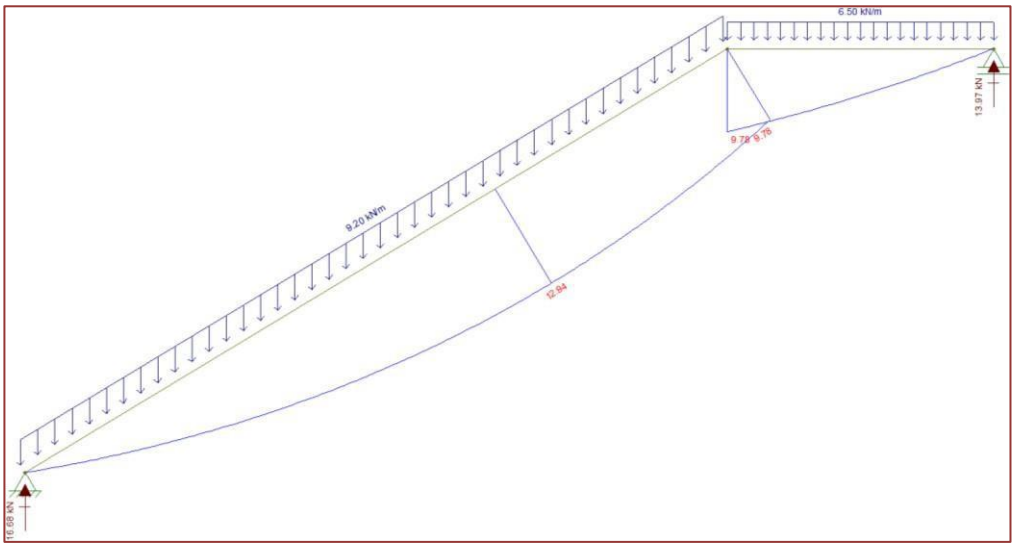


Fonte: Autor, 2023.

Com isso, após a utilização do *solver*, foi analisado e observado que todos os valores obtidos durante o processo de dimensionamento permaneceram dentro dos intervalos impostos como restrições ao solver e que todas as condições, geométricas e de deformação, foram atendidas de forma excelente.

Mas para fins de verificação de cálculos, foi montado no *software FTool* um modelo estrutural da escada, onde o mesmo vai servir para comparar o valor do momento máximo presente na escada obtido pela ferramenta e o obtido pelo *FTool.* Na imagem 10 pode ser observado o esquema estrutural do *FTool*:

Figura 10 – Modelo estrutural da escada da edificação de uso familiar



Fonte: Autor, 2023.

Na figura 11 é possível observar o valor do momento máximo obtido pela ferramenta. É possível observar que os valores obtidos em ambos os casos são os mesmos, o que garante uma eficiência da ferramenta em obtenção de dados.

Figura 11 – Valores das reações e momento obtidos pela ferramenta para o exemplo 1

5 -REAÇÕES E MOMENTOS

V_B = 13,97 kN

V_A = 16,68 kN

$V_{A,B}$ = 14,28 kN

$M_{(X)}$ = 14,28 x - 7,88 .x²/2

Derivando a função acima obtemos:

14,28 - 7,88 .x = 0

Logo o valor do ponto onde será máximo é:

X = 1,81 m

$M_{(máx)}$ = 12,94 kN.m ou M_a = 1294,44 kN.cm

Fonte: Autor, 2023.

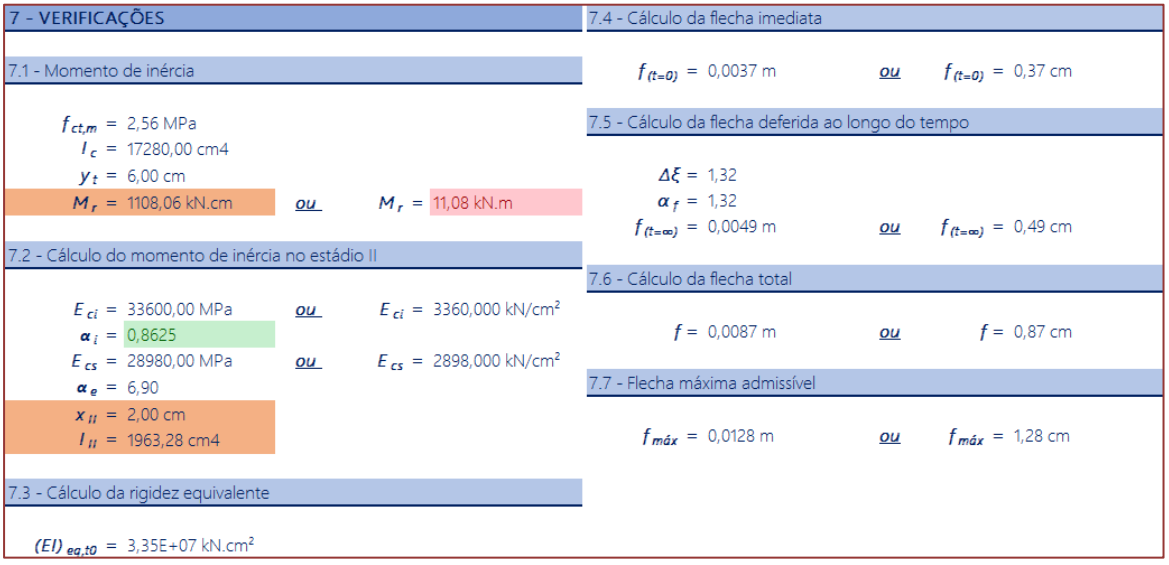
Na Figura 12 a seguir estão os resultados obtidos no dimensionamento da mesma:

Figura 12 - Resultados do problema analisado

Fonte: Autor, 2023.

Vale ressaltar que as condições impostas por parte das deformações também foram atendidas de forma que o dimensionamento foi bem executado por parte do *solver*. Na Figura 13 podem ser observadas as verificações feitas para a escada anteriormente dimensionada.

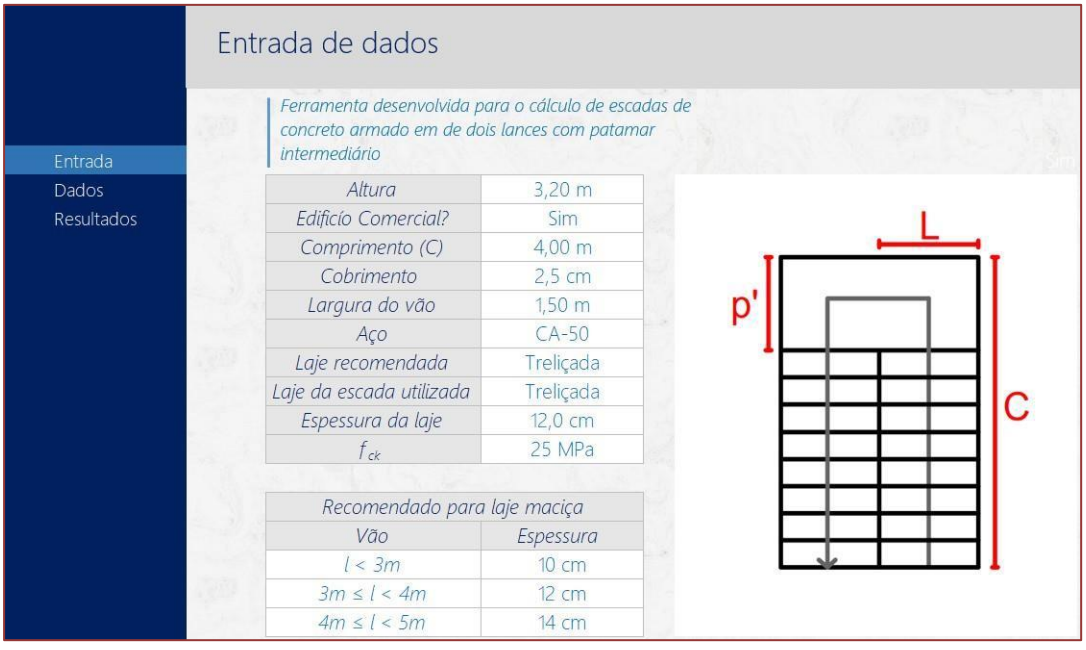
Figura 13 – Verificações feitas para a escada



Fonte: Autor, 2023.

Para a edificação de uso de comercial foi considerado que a escada deveria vencer uma diferença de altura de 3,20m, com vãos de 1,50m de comprimento, com um comprimento para alocação da mesma de 4,00m. Neste exemplo também foi adotado uso de aço CA-50 e cobrimento de armadura de 2,5cm. Na Figura 14 pode ser observado a tela de dados de entrada:

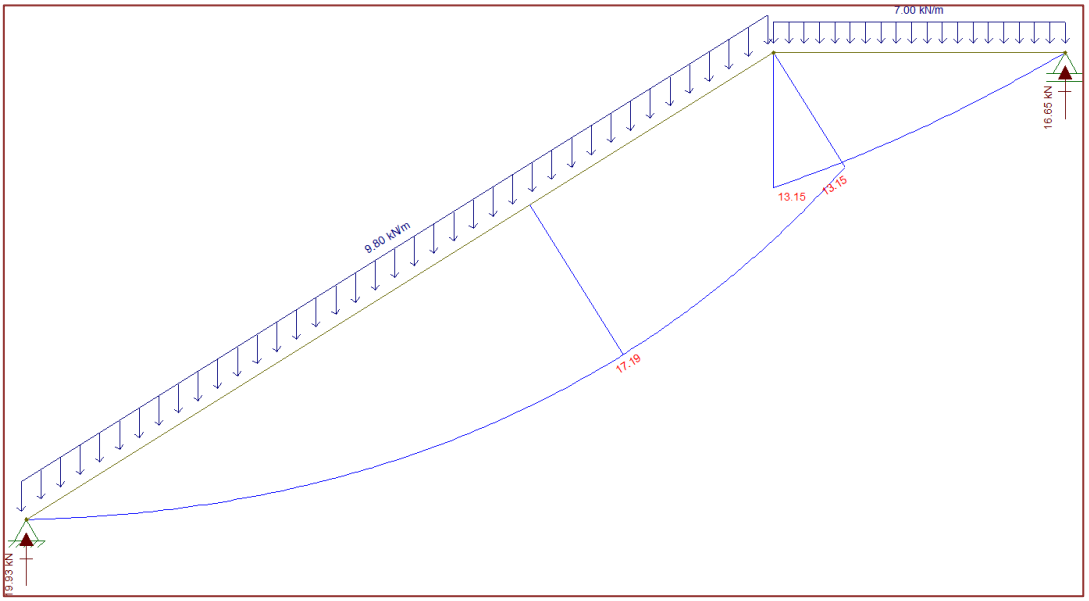
Figura 14 - Entrada de dados para o edifício comercial



Fonte: Autor, 2023.

Na figura 15 pode ser observado, também, os valores obtidos pelo *FTool* para as reações de apoio e do momento máximo para este exemplo:

Figura 15 – Modelo estrutural da escada da edificação comercial



Fonte: Autor, 2023.

E para fins de comparação na imagem 16 podem ser observados os valores obtidos pela ferramenta, e como poderá ser observado, todos os valores obtidos pela ferramenta, tanto de momentos, como também, de apoios foram iguais aos valores obtidos com o uso do *FTool.*

Figura 16 – Valores das reações e momento obtidos pela ferramenta para o exemplo 2

5 -REAÇÕES E MOMENTOS

V_B = 16,65 kN

V_A = 19,93 kN

$V_{A,B}$ = 16,90 kN

$M_{(X)}$ = 16,90 x - 8,31 .x^2/2

Derivando a função acima obtemos:

16,90 - 8,31 .x = 0

Logo o valor do ponto onde será máximo é:

X = 2,03 m

$M_{(máx)}$ = 17,19 kN.m ou M_a = 1718,66 kN.cm

Fonte: Autor, 2023.

Neste exemplo foi recomendado pela ferramenta 9 degraus por lance, de maneira que o patamar intermediar está na altura de 1,50m, a escada não ultrapassou o comprimento máximo disponível, mantendo-se com 3,56m de comprimento horizontal e tendo um patamar de 1,00m de comprimento.

Aqui também foi possível observar que o algoritmo obteve uma solução, considera ótima pelo mesmo, para esse problema em questão, visando o menor custo.

Para este exemplo também foi observado que todas as condições impostas ao *solver*, tanto geométricas quanto de deformação, foram satisfeitas e os dados obtidos estão de acordo com o que era desejado.

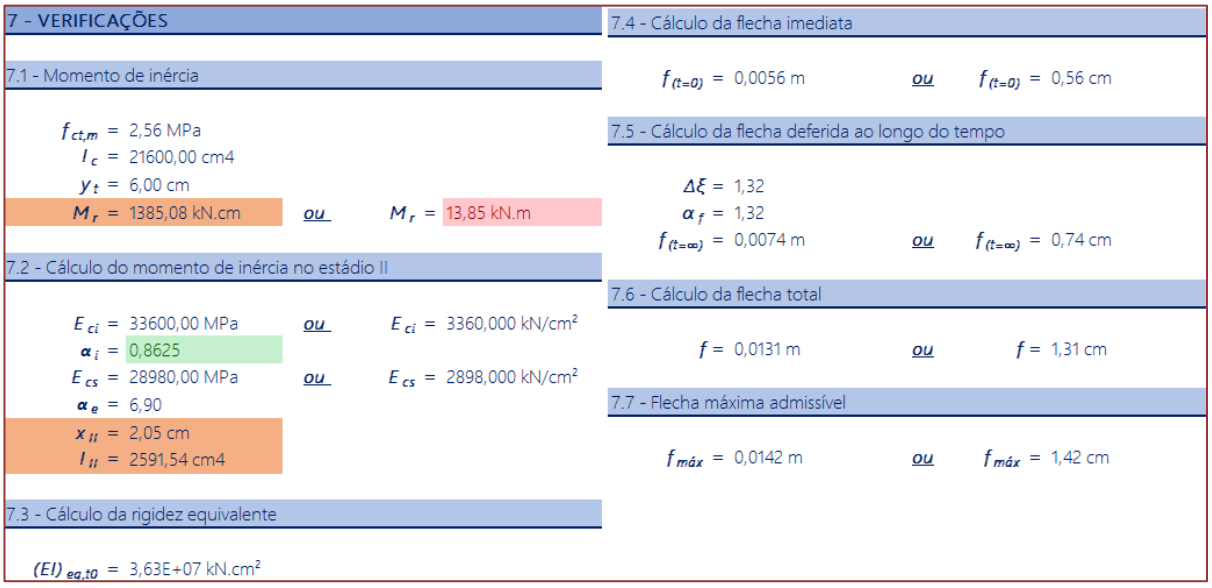
Na Figura 17 podem ser observados os resultados retornados ao usuário:

Figura 17 – Resultados do edifício comercial.

Fonte: Autor, 2023.

Neste exemplo as deformações obtidas para a escadas permaneceram inferior a deformação limite para a mesma, como pode ser observado na figura 18:

Figura 18 – Verificações feitas para a escada de uso comercial



Fonte: Autor, 2023.

4. DISCUSSÕES

Para fins de comparação, ambos os exemplos presentes nesse trabalho foram desenvolvidos de forma manual para comprovar a eficiência, e precisão nos cálculos desenvolvidos pela ferramenta, de forma a garantir que a mesma pode ser empregada no meio profissional.

Algo foi observado após o desenvolvimento dos exemplos anteriores é que a bitola da barra de aço manteve-se com o mesmo valor para os dois exemplos e após analisar isso um pouco, muitas vezes variando os valores manualmente, e que para ambos os exemplos as cargas para as escadas eram tão baixas que a barra de 12,5mm era o suficiente para atender os requisitos de deformação da escada, onde mesmo com barras de 12,5mm o espaçamento manteve dentro do aceitável e a relação número de barras por custo, era a mais adequada.

Além dos dois exemplos que foram mostrados anteriormente, foram testados alguns valores para analisar se as restrições impostas ao *solver* eram obedecidas, em todos os casos que o solver retornou valores as restrições foram devidamente atendidas.

Algumas tentativas o *solver* não conseguiu retornar valores, por não ter sido possível encontrar uma solução que atendesse a todas as restrições. Onde esses exemplos eram de valores impossíveis de encaixar uma escada que atendesse a norma, possuía uma grande altura e pouco espaço horizontal, o que fazia com que a pisada e o espelho da escada tivessem valores fora do intervalo que foi imposto ao *solver*, impossibilitando o mesmo de encontrar uma solução viável para o problema a ele apresentado.

Vale ressaltar a eficiência na obtenção dos resultados, onde uma vez inseridos os valores pelo usuário e fazendo com que a ferramenta *solver* buscasse o valor, o mesmo era obtido em poucos segundos o que ajuda muito durante o processo de cálculo estrutural.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista tudo o que foi apresentado e discutido anteriormente, pode-se concluir que o trabalho obteve êxito no que foi proposto, uma vez que foi capaz de criar um algoritmo de otimização capaz de otimizar o custo de materiais de uma escada de concreto armado com dois lances paralelos e um patamar intermediário, utilizado a ferramenta *solver* do Microsoft Excel.

Diante disto pode-se afirmar que a ferramenta desenvolvida cumpre com a ideia de ser mais eficiente, quando levado em consideração o tempo, que desenvolver todos os cálculos de forma manual, uma vez que utilizada no meio prático e profissional, esta iria trazer para o usuário o ganho de tempo para resolução de problemas a ele apresentado, de forma que a ferramenta apresenta soluções executáveis.

A ferramenta apresentou resultados satisfatórios para os problemas apresentados a mesma, dado as condições a ela impostas. Pode se destacar como vantagem, além da fácil manipulação, a rapidez e precisão dos dados gerados pela mesma, onde, em muitos casos, gera ao usuário, projetista, um ganho de tempo em seu projeto.

REFERÊNCIAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

[2] **CAIXA ECONÔMICA FEDERAL (CEF). SISTEMA NACIONAL DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL – SINAPI**; Vigência 04/2023.

[3] GELAIN, G. A. **Escadas de concreto armado: estudo comparativo do consumo de aço e concreto em função das condições de apoio.** Monografia (Engenharia Civil). Porto Alegre. p. 97. 2016.

[4] VALENTE, E. C. M. **OTIMIZAÇÃO EM PROBLEMAS DE ENGENHARIA CIVIL.** 2020. 156 f. Tese (Mestre em estruturas de Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2020.

[5] ARORA, J. S. **Introduction to optimum design.** 3rd ed. Waltham: Elsevier, 2012.

[6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9050: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos.** Rio de Janeiro, 2015.

[7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro, 2013.

[8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-2: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais.** Rio de Janeiro, 2013.

[9] CHRISTENSEN, P. W.; KLARBRING, A. **A introduction to structural optimization**. 9th ed. Springer, 2009.

[10] KIMURA, Alio Ernesto. **Indústria 4.0, cidades inteligentes e o concreto**. Revista Concreto & Construções, São Paulo, 2019-. ISSN 1809-7197. Trimestral.

[11] OLIVIERI, B. P. **Otimização do projeto de pontes protendidas pré-moldadas pelo método dos algoritmos genéticos**. 2004. 145 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2004.

Capítulo 13

Panorama dos acidentes de trabalho no Brasil e no setor da construção civil

Fábio Brandão Britto
Gilsia Fabiane Oliveira Morais
Anderson Nascimento do Vasco
Aroldo Hitoshi Otsuka

Resumo: As condições de segurança do trabalho na construção civil brasileira são bastante peculiares em virtude desta atividade laboral ser executada em instalações temporárias e provisórias. Nesse cenário, a efetividade da aplicação das normas de saúde e segurança no âmbito da construção civil, encontra dificuldades de impedir agravos à integridade física dos trabalhadores, mesmo com os investimentos em equipamentos de proteção, treinamentos e programas de gestão em saúde e segurança do trabalho. Mesmo nesse contexto, os acidentes de trabalho reduziram no Brasil e em Sergipe. Nos últimos 5 anos pode-se destacar que em Sergipe, o setor da Construção civil obteve uma queda correspondente a 847 acidentes por 100 mil trabalhadores. Na Classificação Nacional de Atividade Econômica (CNAE-2.0), o da Construção de edifícios com código 4120, obteve maior representatividade em acidentes de trabalho no Brasil e Sergipe respectivamente com 31 e 42% dos estudados. E quando se compara os estados de Sergipe com Piauí e Alagoas, observa-se que a média de acidentes de trabalho na construção civil foram proporcionais a empregabilidade, porém observa-se *outliers* (valor que foge da normalidade, pontos fora da curva) nos estados do Alagoas e Piauí, que são valores dispersos da média e que demonstram um aumento nos acidentes de trabalho em 2011 e 2013 respectivamente. Isto demonstra a importância de monitorar as estatísticas de acidente de trabalho na melhoria das políticas públicas e privadas e assim preservar a saúde do trabalhador no ambiente laboral.

Palavras-chave: segurança do trabalho, acidentes, empregabilidade,estatística.

1. INTRODUÇÃO

Os acidentes de trabalho no setor da construção civil estão relacionados com diversos fatores, seja por conta do ritmo intenso da atividade, seja pelas condições provisórias do ambiente de trabalho, falta de mão de obra qualificada e de outros problemas inerentes às condições de trabalho, onde as empresas devem buscar continuamente investimentos que possam aprimorar os meios de prevenção e proteção à integridade e à capacidade laboral dos trabalhadores.

No ambiente da Construção Civil, existem várias situações de risco capazes de provocar acidentes de trabalho. Assim, a análise de fatores de risco em todas as atividades e operações é fundamental para a prevenção de ocorrências (COELHO & GHISI,2016).

O cenário da atividade do setor da construção civil agravou-se com a crise econômica brasileira de 2014/2017 que teve como origem uma série de choques de oferta e demanda, na maior parte ocasionados por erros de políticas públicas que reduziram a capacidade de crescimento da economia brasileira e geraram um custo fiscal elevado (BARBOSA FILHO, 2017).

Este estudo irá avaliar estatisticamente a influência do mercado laboral com os acidentes de trabalho, através da identificação dos códigos da construção civil na classificação nacional de atividades econômicas (CNAE) e o grau de eficiência dos programas de prevenção na área de segurança do trabalho promovidos pelas empresas patronais diante destas variáveis econômicas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada utilizando a metodologia de análise documental do Anuário Estatístico de Acidentes de Trabalho (AEAT), no qual os dados catalogados representam as estatísticas de acidentes laborais sem CAT (Comunicação de Acidentes do Trabalho) registrada e com CAT registrada, que originam os benefícios acidentários concedidos pelo Instituto Nacional do Seguro Social (INSS).

Como a metodologia do AEAT necessitava de uma nova forma de identificação dos acidentes de trabalho que minimizasse a subnotificação dos acidentes e das doenças do trabalho e evitasse que a empresa fosse beneficiada por meio da sonegação de informações ao INSS, foram incluídos estudos aplicando fundamentos estatísticos e epidemiológicos, mediante o cruzamento dos dados de código da Classificação Internacional de Doenças com código 10 (CID-10) e de código da Classificação Nacional de Atividade Econômica (CNAE), que permitiram identificar forte associação entre agravos e as atividades desenvolvidas pelo trabalhador (BRASIL, 2018).

Essa pesquisa é um estudo descritivo e de natureza quantitativa, realizado a partir de dados colhidos no AEAT, incluindo Brasil e Sergipe (dados principais) e os estados de Alagoas e Piauí (dados complementares), entre os anos de 2006 e 2017. Estes dados coletados no anuário são referentes ao número total de acidentes de trabalho e ao número de acidentes de trabalho por CNAE da Construção Civil no Brasil e nos Estados supracitados.

Foram coletados também o número total de trabalhadores empregados no Brasil e por cidade através da relação Anual de Informações Sociais (RAIS) de 2006 a 2017, que fornece informações socioeconômicas das pessoas jurídicas e de outros empregadores

anualmente. Sendo assim, foram extraídos os números de empregados ativos no Brasil e por região de estudo conforme o período estabelecido.

Para a análise estatística dos dados coletados no AEAT e na RAIS de 2006 e 2017 buscou-se associar as variáveis de acidentes de trabalho com a empregabilidade no Brasil e Sergipe (BRASIL, 2017). E a seguir, os dados do Estado de Sergipe serão utilizados para comparar com os dos estados de Alagoas e Piauí que possuem similaridades quanto ao número de empregados ativos e integrarem a região nordeste do país. As estatísticas básicas foram desenvolvidas em planilhas Excel (Microsoft) para todos os parâmetros analisados neste estudo.

Os resultados estatísticos, compreendidos pela caracterização amostral, medidas de tendência central, medidas de variação foram representados em tabelas e gráficos do tipo séries temporais.

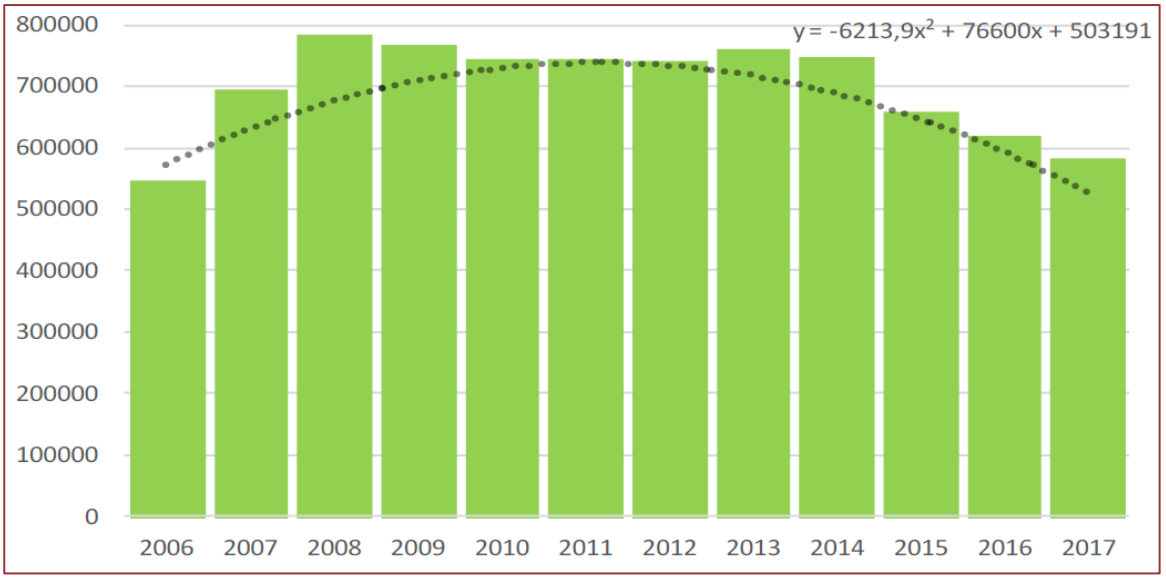
Por meio da pesquisa documental e bibliográfica, o estudo também buscou subsídios complementares para o estudo quantitativo. A documentação será fundamentada pela Normas Regulamentadoras, editadas pelo Ministério do Trabalho, artigos de revistas, livros e periódicos de circulação nacional, que expõem temáticas relacionadas a acidentes de trabalho e suas causas imediatas e básicas.

Outra ferramenta para representar cada parâmetro selecionado ao longo da pesquisa foi a representação gráfica do tipo Boxplot. Esta metodologia possibilita a visualização da assimetria da distribuição, a faixa de variação dos dados, além de permitir a detecção de possíveis pontos extremos, que podem ou não serem excluídos da análise. As representações de Boxplot possibilitam ainda a visualização das seguintes grandezas estatísticas: a média, a mediana (divide o conjunto de dados ao meio, deixando metade dos dados abaixo e metade acima dela), o máximo, o mínimo, o 1^{o} quartil (valor que deixa ¼ das observações abaixo dele), o 3^{o} quartil (valor que deixa ¾ das observações abaixo dele) e os valores extremos da distribuição dos dados. Os pontos extremos podem indicar erros de amostragem, de medida e, mesmo, de transcrição dos dados, ou ainda, simplesmente, um comportamento fora do habitual (RODRIGUES et al., 2014).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os acidentes de trabalho no Brasil no período de 2006 a 2017 vêm decaindo progressivamente, registrando o equivalente a 549.405 acidentes no ano de 2017. Entretanto, no período analisado, os anos de 2008 e 2013 destacam-se por apresentaram os maiores índices de acidentes de trabalho, chegando respectivamente a 747.663 e 725.664 dos casos registrados. Conforme a linha de tendência houve uma redução progressiva anual, em virtude das políticas implementadas pelos órgãos de fiscalização e pela queda da empregabilidade no país (Figura 1).

Figura 1: Acidentes de Trabalho no Brasil de 2006 a 2017



A redução dos índices de acidentes de trabalho no Brasil na década de 2008 a 2017 foi significante quando comparada com o período anterior de 1998 a 2007. A análise dos dados permitiu verificar uma queda acumulada de 46,21% nos índices de acidentes, tendo o ano de 2015 a maior redução destes agravos com 9,88% em relação ao ano de 2014. Os índices de acidentes de trabalho no Brasil foram influenciados pelas políticas públicas e atualizações de normas regulamentadoras do trabalho neste período (Figuras 2a e 2b).

Outra avaliação sobre estes índices de acidentes, desta vez entre 2008 e 2010, mostrou uma redução de 7,15%, fato que pode estar relacionado a menor empregabilidade neste período por causa da crise internacional de 2008/2009 na qual a taxa de crescimento do número de empregos de um conjunto de países latino- americanos caiu 0,5% ao ano e no Brasil esta redução foi de 2% ao ano (BRASIL 2017).

Figura 2a: Índice de acidentes de Trabalho no Brasil de 1998 a 2007

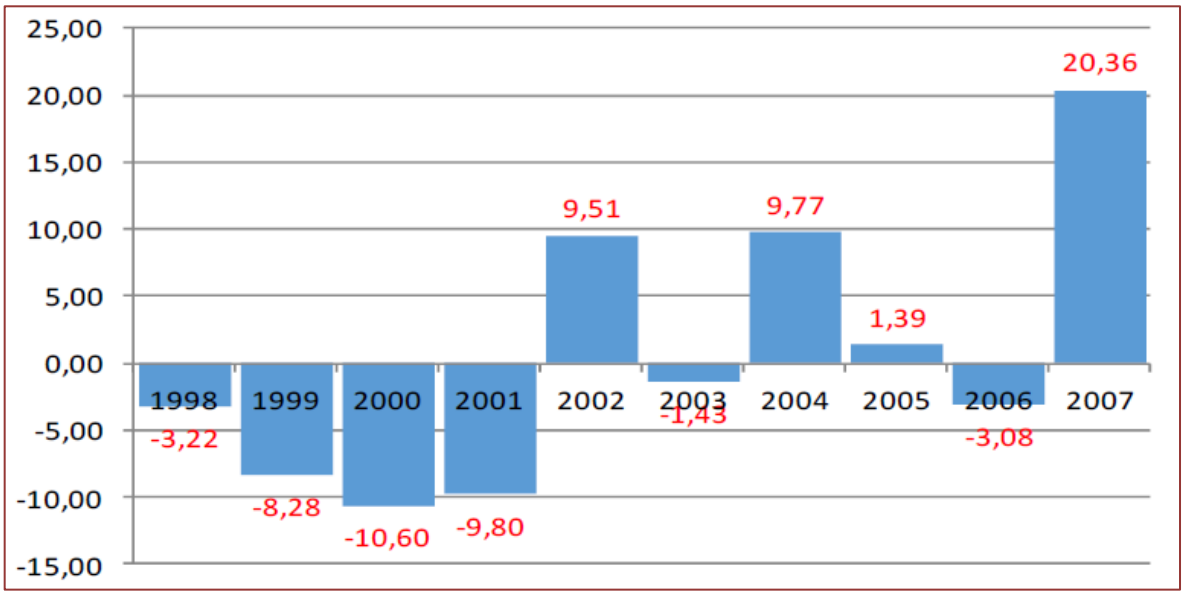
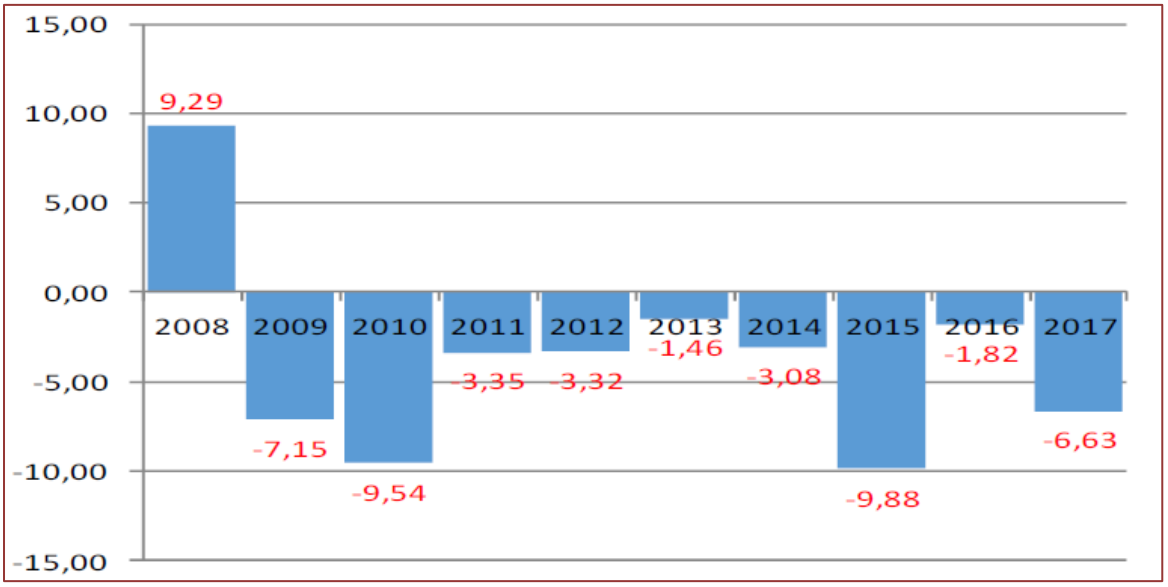


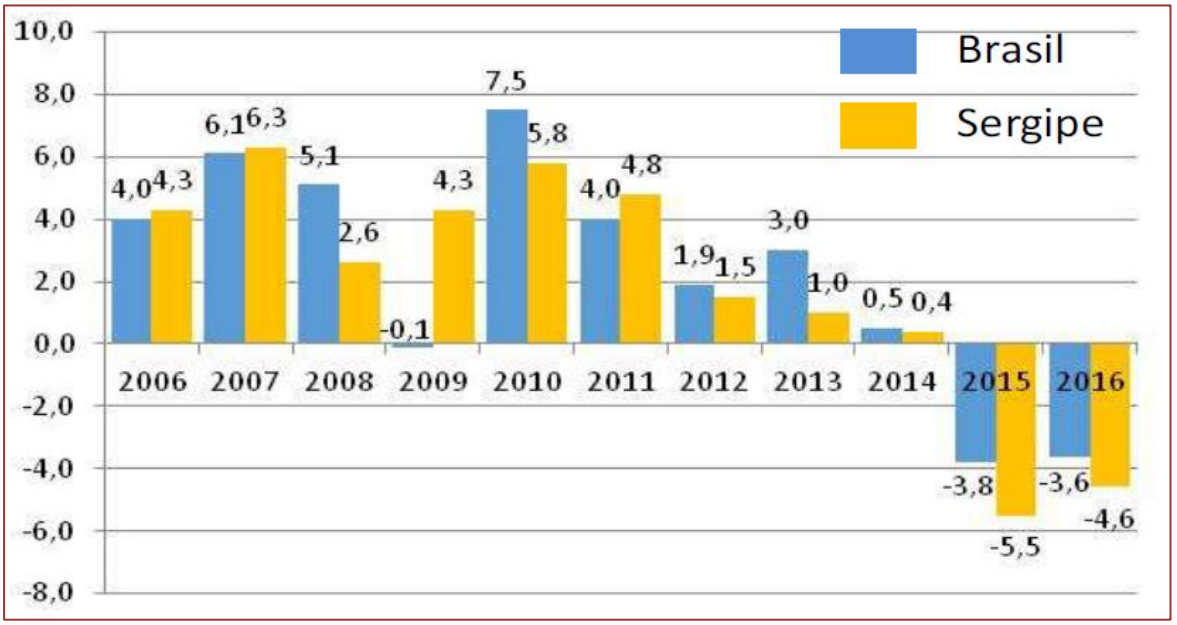
Figura 2b: Índice de acidentes de Trabalho no Brasil de 2008 a 2017



A forte recessão econômica no Brasil, no período de 2014 a 2015, provocou a demissão de diversos empregados em todos os segmentos produtivos e uma queda de cerca de 10% no produto interno bruto (PIB) entre os anos de 2015 e 2016 (Figura 3).

Em Sergipe os resultados do PIB apresentaram redução ao longo de 2016, com um déficit acumulado de 4,6%, enquanto no Brasil a deficiência do PIB no período foi de 3,6%, menor taxa desde 2009. Mesmo com as quedas acumuladas nos valores do PIB, o estado de Sergipe apresentou saldo positivo em 2014 correspondente a 37.472 bilhões de reais. Esta taxa em Sergipe revelou-se insuficiente para gerar emprego e elevar a renda da população a médio prazo (Figura 3).

Figura 3: PIB do Brasil e do estado de Sergipe - 2006 a 2016 (Sergipe 2017)



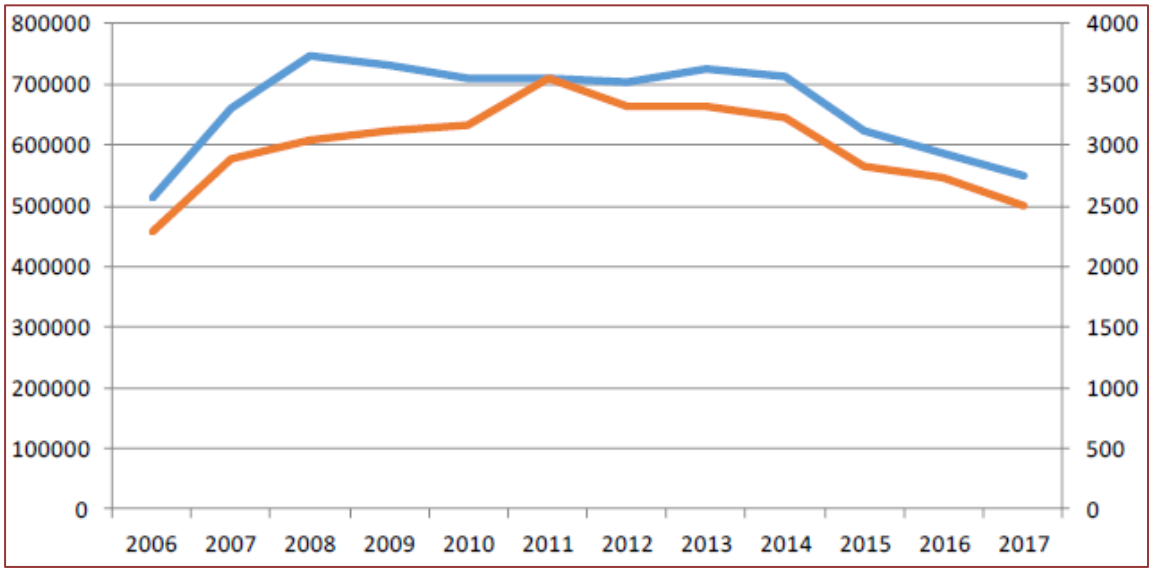
Diante deste cenário de baixo crescimento econômico em Sergipe, com a queda do PIB conforme Figura 3, no ano de 2016 foram eliminados 21.895 postos de trabalho no Estado (BRASIL, 2017). Os setores que mais contribuíram para este saldo negativo foram o de serviços, construção civil e indústria de transformação. Com a redução do número de empregos, observou-se que nessa mesma época o número de acidentes de trabalho em Sergipe cresceu 2,3%, ainda baixo, mas um indicativo preocupante, visto que as doenças do trabalho e acidente de trajeto foram os que mais contribuíram para este aumento com 38,44% e 7,21% respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1: Dados de Acidente de Trabalho em Sergipe de 2006 a 2017

Ano	Trabalhadores	Acidentes de Trabalho	Acidente/ 100.000 Trab.	Evolução ano
2006	302494	2.288	756	
2007	320676	2.889	901	19,11
2008	319246	3.042	953	5,77
2009	344052	3.122	907	-4,77
2010	369579	3.158	854	-5,83
2011	385837	3.555	921	7,83
2012	388507	3.317	854	-7,34
2013	405775	3.315	817	-4,31
2014	417023	3.223	773	-5,40
2015	404968	2.819	696	-9,93
2016	383073	2.728	712	2,30
2017	390462	2.501	641	-10,06

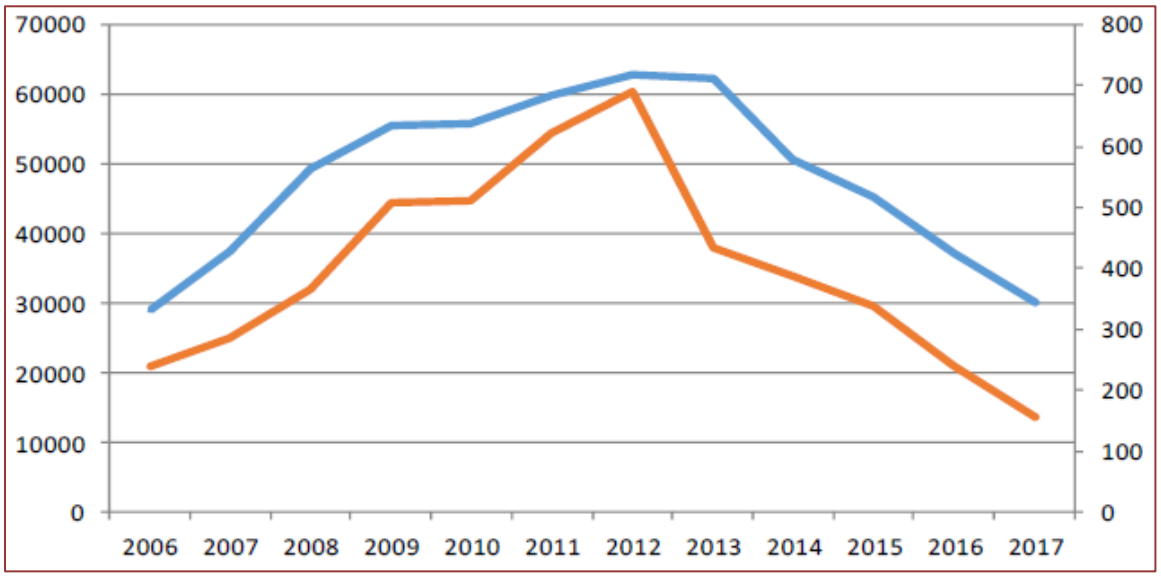
Quando comparados os números de acidentes no Brasil com o estado de Sergipe, pode-se observar que o comportamento do gráfico possui uma similaridade no seu contorno (Figura 4). Vale destacar que o pico de acidentes no Brasil ocorreu em 2008 com 747.663, enquanto em Sergipe o maior índice ocorreu em 2011, com 3.555 acidentes de trabalho. Esse número de acidentes de trabalho registrados no país em 2008 representa um aumento de 13,4% em relação a 2007. O secretário de Políticas da Previdência Social da época, Helmut Schwartz, afirmou que entre as seis principais causas de acidentes no trabalho, quatro envolvem ferimentos nos punhos e nas mãos dos trabalhadores, mostrando que os processos de trabalho e a manipulação de objetos precisam ser redesenhados. O secretário observou também a necessidade de investimentos em prevenção e maior preparo dos trabalhadores para evitar queimaduras, esmagamentos, amputações, cortes e inflamações e também mortes (CANUTO, 2018).

Figura 4: Total Geral de acidentes de trabalho no Brasil (azul) e em Sergipe (Laranja)



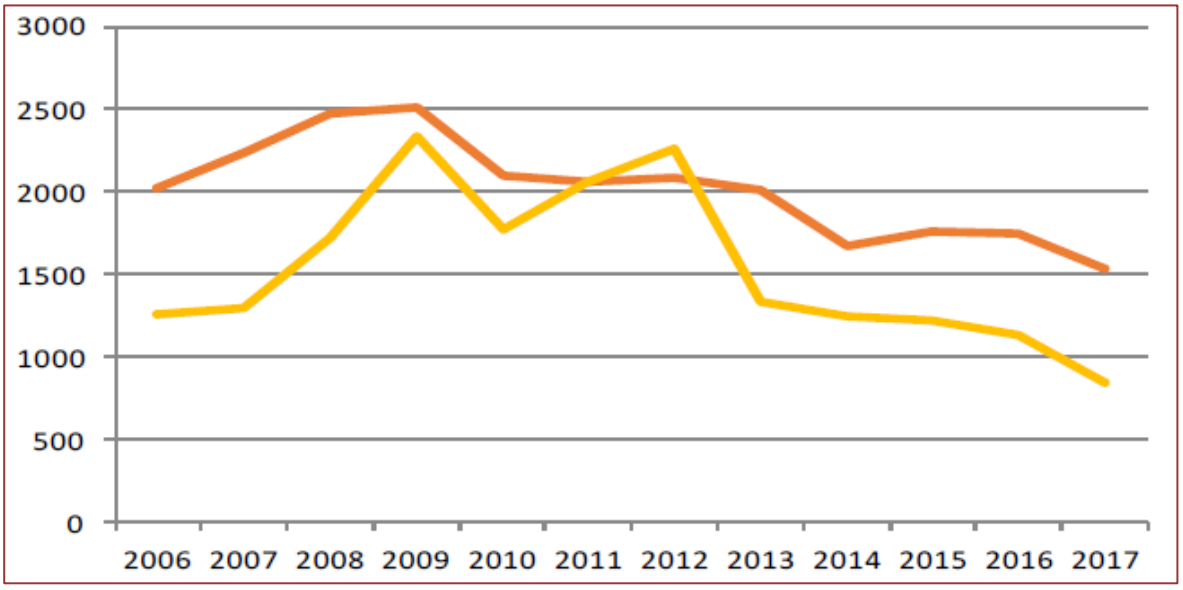
Para o setor da construção civil, o maior número de acidentes de trabalho ocorreu no período entre 2011 e 2012, atingindo 62.874 no Brasil e 691 casos em Sergipe, ambos em 2012 (Figura 5). Segundo as projeções da época, o PIB brasileiro em 2012 fechou na casa do 1%, enquanto que a construção civil encerrou o ano com um crescimento de 4%. A taxa de empregabilidade teve uma melhora de 5,8% em relação a 2011, o que significa que houve 3,415 milhões de trabalhadores atuando formalmente nas obras espalhadas pelo país (Santos, 2018). Sendo assim, o aumento número de trabalhadores na construção civil pode está relacionado a elevação dos acidentes de trabalho neste setor.

Figura 5: Total Geral de acidentes de trabalho na Construção Civil no Brasil (azul) e em Sergipe (Laranja)



Quando se compara a quantidade de acidentes de trabalho na construção civil entre Brasil e Sergipe, pode-se observar um crescimento pontual de 25,5% em Sergipe e uma queda 0,65% para ambos nos anos de 2011 e 2012. Este aumento no número de acidentes de trabalho na construção civil entre 2010 e 2011 foi de 16% e entre 2011 e 2012 de 9,5%, envolvendo acidentes típicos e de trajeto com CAT registrada, e acidentes sem CAT registrada (Figura 6). Quando se compara o número de trabalhadores ativos que sofreram acidentes de trabalho, observa-se também um incremento proporcional de 30% nesse mesmo período em Sergipe. Posteriormente em 2017, o setor da Construção civil em Sergipe, obteve uma queda de 25% nos registros de que corresponde a 847 acidentes por 100mil trabalhadores.

Figura 6: Relação de Acidente de Trabalho por 100.000 trabalhadores ativo na Construção Civil para o Brasil (Laranja) e Sergipe (Amarelo)



Por meio dos tipos de riscos ocupacionais das empresas elencados na Classificação Nacional de Atividade Econômica (CNAE-2.0), esse estudo buscou identificar quais as atividades incluídas no setor da construção civil que obtiveram maior representatividade nos acidentes de trabalho no Brasil e em Sergipe, o que permitiu identificar uma forte associação entre os agravos e as atividades desenvolvidas pelos trabalhadores.

Os códigos da CNAE relacionados a Construção Civil e selecionados nesta pesquisa foram descritos na Tabela. Com relação a CNAE 4120 (Construção de Edifício) ocorreram 198.009 acidentes de trabalho no Brasil e 1413 em Sergipe entre 2006 a 2017, que representam 31% e 42% respectivamente do total de acidentes ocorridos (Tabela 2). Além disso, observa-se que o código 4299 da CNAE (Obras de engenharia civil não especificadas) atingiu o 4º maior índice no Brasil com 42.421 de acidentes de trabalho (7%), enquanto que o 4330 da CNAE (Obras de acabamento) obteve 2 º maior índice de ocorrência de acidentes em Sergipe, com 655 casos (20%).

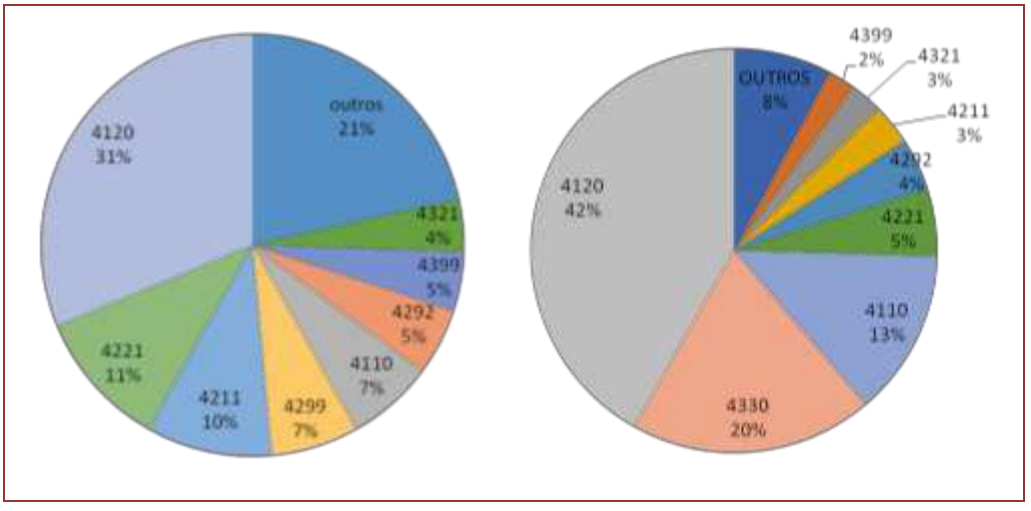
Estes resultados possibilitam perceber que as empresas instaladas no Brasil e em Sergipe, em virtude da sua autonomia administrativa podem desenvolver atividades similares, no entanto apresentam comportamentos distintos quanto a ocorrência de acidentes de trabalho, que podem ser influenciados pelos sistema de gestão de segurança para proteção e prevenção destes tipos de infortúnios.

Tabela 2: Classificação Nacional de Atividades Econômicas para o setor da Construção Civil e número de acidentes de trabalho no Brasil e Sergipe

CNAE	Descrição	Acidentes Brasil	Acidentes Sergipe
4110	Incorporação de empreendimentos imobiliários	42393	450
4120	Construção de edifícios	198009	1413
4211	Construção de rodovias e ferrovias	61242	109
4221	Obras para geração e distribuição de energia elétrica e para telecomunicações	66797	181
4292	Montagem de instalações industriais e de estruturas metálicas	32446	143
4299	Obras de engenharia civil não especificadas anteriormente	42421	--
4321	Instalações elétricas	25538	90
4330	Obras de acabamento	--	655
4399	Serviços especializados para construção não especificados anteriormente	28797	73

Ainda podemos destacar que no Brasil as empresas de obras para geração e distribuição de energia elétrica e para telecomunicações e Construção de rodovias e ferrovias, representam 22% dos números de acidentes de trabalho, e em Sergipe as empresas de Incorporação de empreendimentos imobiliários e obras de acabamento tiveram 33% de acidentes (Figura 7).

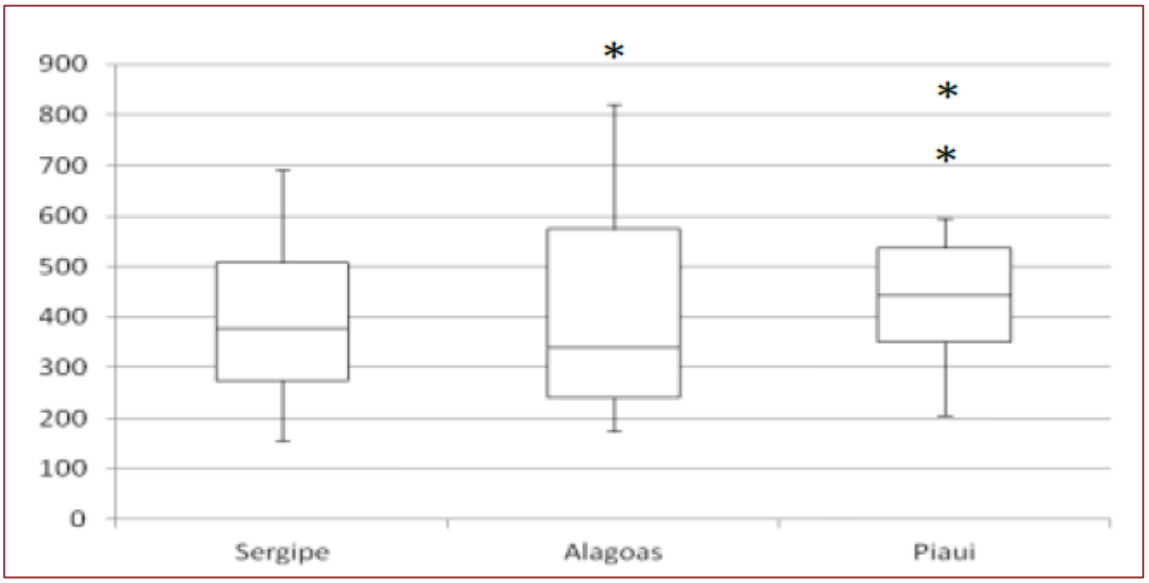
Figura 7: Relação de Acidentes do Trabalho por CNAE no Brasil e Sergipe na Construção Civil



Quando avaliamos o comportamento da região nordeste quanto aos casos de acidentes de trabalho, selecionamos os estados que apresentaram características similares quanto a empregabilidade. Neste contexto, foram escolhidos os estados de Sergipe, Piauí e Alagoas que tiveram no período de 2006 a 2017 a média de empregabilidade 369.308, 393.847 e 471.349 respectivamente. Dos resultados de acidentes de trabalho ocorridos no período de 2009 a 2013, as maiores incidências dos três estados expressos

no gráfico Box Plot (Figura 8), mostraram que os estados de Alagoas e Sergipe tiveram a maior dispersão.

Figura 8: Gráfico Boxplot dos acidentes de trabalho dos estados de Sergipe, Alagoas e Piauí



Para os estados de Piauí e Alagoas foram observados outliers, que são valores de dados que estão distantes dos outros valores representado por "*", sendo em 2011 com 929 (Alagoas) e em 2012 e 2013 com 726 e 866 (Piauí) respectivamente de acidente de trabalhos. Esses valores podem afetar fortemente os resultados estatísticos, principalmente elevando os valores da média de acidentes de trabalho por determinado período.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crise econômica brasileira dos últimos anos impactou no crescimento do setor da Construção Civil, no que tange a lançamentos de novos empreendimentos e contratações de funcionários para execução das obras. Considerando a baixa empregabilidade neste setor no período analisado, houve redução nos índices de acidentes de trabalho no Brasil, que em 2017 obteve o menor valor em relação aos 10 anos anteriores, que registraram 549.405 acidentes.

Em Sergipe, a eliminação 21.895 postos de trabalhos no ano de 2016 na construção civil, resultou em uma queda equivalente a 25% nos índices desses tipos de agravos no ano de 2017, o que correspondeu a 847 acidentes por 100 mil trabalhadores.

Os percentuais de acidentes de trabalho no Brasil e em Sergipe apresentaram declínio por causa de fragilidades econômicas e baixa empregabilidade, entretanto estes índices precisam ser conseguidos com a implantação de eficientes políticas de segurança e saúde pelas empresas, que incluam o respeito às instruções normativas por parte dos trabalhadores, bem como que tenham a participação do governo através amplie das políticas públicas no setor segurança do trabalho e preservação da integridade do

capital humano.

Nos últimos 12 anos os códigos da CNAE 4120, 4221 e 4211 ocorridos no Brasil, e 4120, 4330 e 4110, em Sergipe, representaram mais de 50% dos acidentes de trabalho registrados. Destas atividades mais prevalentes, a pesquisa demonstrou que a construção de edifícios (4120) é destaque tanto no Brasil com 31% dos índices quanto em Sergipe com 42% dos acidentes de trabalho. Estes resultados reforçam a tese da importância do serviço de segurança do trabalho na gestão e implementação de uma cultura de segurança na empresa, que envolva seus diretores e toda equipe de trabalhadores para o sucesso das ações de proteção e prevenção de acidentes de trabalho.

Os trabalhadores estão suscetíveis a vários riscos a sua saúde e integridade física, porém um aumento nos índices de acidentes ou doenças ocupacionais exigirá ações mais efetivas por parte do setor de segurança, através da identificação e correção dos desvios não previstos e indesejáveis.

REFERÊNCIAS

[1] BARBOSA FILHO, F.H.; **A crise econômica de 2014/2017**. Estudos Avançados, Instituto Brasileiro de Economia, Fundação Getulio Vargas, Rio de Janeiro, 2017

[2] BRASIL-**Anuário Estatístico de Acidentes do Trabalho**: AEAT 2017 / Ministério da Fazenda. Brasília: MF, 2017.

[3] BRASIL-MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Anuário Estatístico de Acidentes do Trabalho** (AEAT). Seção II - Indicadores de acidentes do trabalho. Brasília, 2017. Volume 1. pag. 10. Disponível em: . Acesso em 20 julho 2018

[4] CANUTO, Lourenço, Acidentes de trabalho crescem 13,4% entre 2007 e 2008, **Revista Rede Brasil Atual**, consulta em https://www.redebrasilatual.com.br/trabalho /2009/12/acidentes-de-trabalho- crescem-13-4-entre-2007-e-2008

[5] COELHO, D. F. B.; Ghisi, B.M.;**Acidente de trabalho na construção civil em Rondônia,** Editora Blucher,São Paulo,2016.

[6] RODRIGUES, E. R. D.; HOLANDA, I. B. B.; CARVALHO, D. P.; BERNARDI, J. V. E; MANZATTO, A. G.; BASTOS, W. B.; Distribuição

[7] espacial da qualidade da água subterrânea na área urbana da cidade de Porto Velho, Rondônia, **Revista Scientia Amazonia**, v. 3, n.3, 97-105, 2014.

Capítulo 14

São Paulo, cidade das águas: interfaces entre a engenharia e a gestão urbana nas obras hidráulicas dos séculos XIX e XX

Saide Kahtouni

Resumo: Este artigo, oriundo de longa pesquisa de doutorado, trata das ações de engenharia hidráulica realizadas desde o final do século XIX na cidade de São Paulo, considerando as técnicas vigentes e as interfaces destas intervenções com a urbanização das várzeas da cidade e as ações pioneiras do setor de geração hidroelétrica, vetores de aproveitamento de novas terras para a urbanização, em oposição à necessidade de preservação do espaço natural das águas e suas paisagens. Além disso, as questões vinculadas à organização propriedade e da posse de terras também se revelaram importantes, conforme alguns documentos aqui apresentados.

Palavras-chave: Cidade e águas, urbanização paulistana, paisagem urbana, arqueologia da paisagem.

1. BREVE INTRODUÇÃO

A necessidade da correta e mais precisa compreensão dos fenômenos urbanos prescinde da pesquisa histórica, alicerce objetivo das indagações urbanísticas que se pretendem costurar, para a explicação do presente e a construção do futuro. É este o principal papel da história.

O trabalho do urbanista contemporâneo deve, portanto, percorrer as indagações históricas, desvendando sucessivos processos de espacialização, em busca da correta compreensão da cidade onde intervirá. Os processos de espacialização podem ser lidos e interpretados através de cartas e documentação iconográfica que nos remetem a uma espécie de "busca arqueológica" do conjunto da prática urbanística sobre dado território também a partir da sociedade industrial (HUDSON:1979). A gestão contextualizada ao longo do tempo, por sua vez, é guardada na documentação reunida pelas leis vigentes e implantadas na época das espacializações.

No caso dos recursos hídricos, assunto sobre o qual me debrucei mais atentamente, a cidade de São Paulo registrou também os seus processos de espacialização nas áreas de várzeas e fez da engenharia e suas obras instrumentos de profundas transformações urbanas e sociais ocorridas no espaço desta sociedade, notadamente a partir do século XIX. O conjunto de leis e instrumentos de controle da propriedade fundiária inaugurados na segunda metade do XIX, deu início a uma gestão urbana de claro cunho positivista, trazendo à cidade seu aspecto de hoje e ao longo do tempo foi assim configurando a sua paisagem, a sua fragmentação e os seus problemas.

2. A ENGENHARIA E A GESTÃO URBANA NAS OBRAS HIDRÁULICAS PAULISTANAS A PARTIR DA LEI DE TERRAS

A partir de 1872, quando São Paulo, uma quieta e pacata vila de estudantes, passa a crescer assustadoramente ao longo dos seus novos eixos ferroviários, implantados a partir de 1860, no sentido norte/sul e Leste-Oeste, já estavam em vigor a Lei de Terras e suas regulamentações. Este instrumento legal, instaurado no País em 1850, ainda sob a égide imperial, foi pioneiramente transportado do campo jurídico ao conhecimento histórico-urbanístico pelos trabalhos do professor Murillo Marx, meu orientador na tese "Cidade das águas". Esse saudoso professor estudou exaustivamente os reflexos espaciais da implantação dessas novas legislações, trazendo novos paradigmas para o processo de gestão das cidades brasileiras, cuja rede estava ainda em processo de formação e desenvolvimento naquele momento (MARX: 1991).

A partir daí, a questão fundiária, tratada por esses novos instrumentos legais criados ainda no Império, transformou-se na alavanca para todo um processo de transformação das relações entre os habitantes das cidades brasileiras e o solo, seja urbano ou rural, a exemplo do que vinha acontecendo no continente europeu, como um nítido reflexo das revoluções técnicas.

No Brasil, eram os costumes coloniais, vigentes ainda na primeira fase do Império brasileiro, os quais determinavam no espaço urbano a existência dos rossios e das datas de terra, estas últimas, porções menores de solo geralmente urbano, obtidas por concessões de uso, a exemplo das rurais sesmarias (MARX:1991). A Lei de Terras, promulgada em 1850, ainda no Império, visava o rompimento com esta tradição e tarda a transformar estas antigas relações, já muito arraigadas nos poucos núcleos urbanos estruturados no país. A partir daí, não mais se demandariam pedaços de terra urbana para

a moradia e plantação sob a condição do foro, dentro da ideia dos valores de uso, resquícios de relações coloniais calcadas em tradições antigas de donatarias e dependências quase servis, mas se adiantava a condição de propriedade dentro de um novo regime capitalista mundial, em processo de implantação.

Nesta cidade de São Paulo, que crescia a partir das correntes migratórias de cultura urbana que vinham do porto de Santos serra acima, a partir de 1850, foram, então, fundamentais a garantia de posse das terras e a ocupação de todo o estoque de solo urbano que pudesse se tornar mercadoria, com valores de troca.

Nesse contexto, também se situava a implantação das novas linhas férreas, que interligavam a cidade de São Paulo ao interior, ao Porto de Santos e ao Rio de Janeiro. Por outro lado, os investimentos em estoques de terras urbanas tornaram-se atrativos numa realidade onde o custo da mão-de-obra escrava, tornava-se inviável economicamente. Isso se traduz num processo que incide sobre as relações entre cidadãos paulistanos e as águas da cidade, inaugurando a grande sequência, praticamente ininterrupta, das urbanizações e saneamentos dos terrenos alagadiços e dos avanços da urbanização sobre os territórios das águas.

MONACO (1991:43), assim interpretou o advento da Lei n. 601 de 18 de setembro de 1850:

> ... “entre 1820 e 1840, o poder nacional passou dos senhores de engenho para a oligarquia cafeeira que, atingida pela elevação do preço da mão de obra escrava, procurou saída no incentivo às imigrações estrangeiras. A Lei de Terras... foi a consolidação de um processo de proteção ao latifúndio, por estabelecer que o acesso à terra pública somente seria possível através da compra... Ocorria assim uma mudança radical na política da terra, inclusive com a criação de um órgão de controle específico, a Repartição Geral de Terras Públicas, subordinada ao Ministro e Secretário de estado dos Negócios do Império...”

Os novos interesses pela aquisição de terras moldam todo um amálgama de novas leis pelas décadas seguintes dos oitocentos, que, possibilita inclusive a aquisição de concessões de terras públicas partindo da definição de terra devolutas constante da Lei de 1850. A definição de terras devolutas, passíveis de aquisição de concessões incidirá também sobre terras originalmente públicas, situadas às margens dos rios navegáveis. (KAHTOUNI, 2004: 28). A maior preocupação era com os territórios agrícolas rurais, mas a aplicabilidade dos instrumentos legais termina por abranger também os territórios urbanos, em processo de consolidação e expansão. Coincidentemente, estas terras, consideradas devolutas, se concentrariam nas áreas de urbanização mais difícil. Vale lembrar as palavras do prof. Murillo Marx:

> “Entre os vazios devolutos de uma concentração, devidos a obstáculos topográficos, hidrográficos ou geológicos, há que recordar os fundos de vale, as grotas e as falhas dos terrenos. Esses impedimentos de ordem geográfica negam determinadas ocupações humanas pretendidas, como a expansão de uma cidade reticulada e regular. Ou estancam o avanço das ruas ortogonais, ou apontam outros traçados viários, como ilustram centenas de povoações paulistas na terra roxa do oeste, ou persistem hiatos urbanos.” (MARX:1980:71).

As cartas da evolução urbana de nossa cidade de São Paulo, claramente demonstram tal afirmação, que poderia ser traçada para um conjunto das cidades brasileiras. Em especial vale a pena rever a carta de 1897, onde a presença dos cursos d´água como obstáculos ao avanço urbano é bem nítido, configurando uma ocupação fragmentada pela existência dos grandes fundos de vale desde o primeiro surto do crescimento da cidade. Os novos loteamentos surgiam limitados, assim, pelos cursos d´água, que neste momento, ainda corriam de uma forma meândrica, em grande parte da cidade.

A partir de 1854, ano da regulamentação da Lei n. 601 de 1850, todo um esforço de cadastramento e organização dos estoques de terra em posse de particulares, ou públicas e devolutas, principia. Primeiramente, partindo dos registros paroquiais, dada à intensa conexão entre o primitivo sistema de cessão de terras e a Igreja, o que trouxe sobreposições, falhas descritivas e inúmeras confusões e apropriações indébitas. Este processo adquire feições mais objetivas e científicas somente a partir da criação das primeiras comissões geográficas e geológicas nacionais e da formação de um importante corpo de engenheiros no país, fazendo uso da agrimensura e da topografia para a consolidação de mapeamentos mais precisos e localizados, e ainda assim, fortemente atrelados aos interesses governamentais de estímulo às atividades agrícolas e implantação do sistema ferroviário.

O papel dos primeiros engenheiros civis brasileiros, alguns já aqui formados pela Escola Central, a pioneira, implantada a partir de 1858, como entidade desmembrada da antiga Academia Militar do Rio de Janeiro, para o desenvolvimento de estudos cartográficos e de um pensamento vinculado às atividades de planejamento territorial nacional, regional e urbano, foi apontado por diversos trabalhos importantes de pesquisadores. Podemos destacar dentro desta perspectiva os trabalhos de pesquisa de TELLES:1994, SIMÕES JR:1990 e 1995, e um estudo muito interessante de Augusto Maia Costa, publicado em 2003, derivado de sua pesquisa orientada pela Prof. Maria Lúcia Gitahy da FAUUSP, que tratou, em especial, da trajetória de Theodoro Sampaio.

Theodoro Sampaio, formado em engenharia civil pela Escola Politécnica do Rio de Janeiro em 1877, foi um pioneiro dos estudos geográficos em nosso País, tendo realizado diversos trabalhos de levantamento hidráulico de regiões do Brasil. Em 1886, ele chegou a São Paulo, assumindo como primeiro engenheiro, a direção da Seção de Topografia da Comissão Geográfica e Geológica chefiada pelo geólogo Orville Derby.

Neste momento, a importância dos trabalhos de cadastramento de terrenos e rios através do gabinete topográfico era fundamental para a correta divisão fundiária e a execução das obras de infraestrutura urbana.

Em 1890 realiza os estudos para os melhoramentos sanitários da capital paulista, nomeado pelo governador Prudente de Morais. Teve um papel muito importante na formação das comissões de trabalho de levantamentos e estudos iniciais das áreas a serem saneadas. Theodoro Sampaio chefiou depois, tecnicamente, até 1892, a Companhia Cantareira de Águas e Esgotos, sendo responsável pelo planejamento do abastecimento da cidade de São Paulo até 1893. Foi um dos fundadores da Escola Politécnica de São Paulo. Em 1898 foi nomeado diretor e engenheiro chefe do Saneamento do Estado, dirigindo este serviço até 1903, quando retornou à Bahia, seu estado natal, onde seguiu trabalhando, voltado para outros trabalhos de igual importância, sendo depois sucedido por Saturnino de Brito, cujos trabalhos detalharemos mais adiante.

3. SANEAMENTOS, URBANIZAÇÕES, LEIS E CÓDIGOS. A LEI DE TERRAS E AS TERRAS DEVOLUTAS

Nessa passagem entre os séculos XIX e XX as questões fundiárias nas cidades permaneciam ainda num segundo plano de resolução, mesmo após a definitiva introdução do ideário sanitarista europeu no Brasil. As obras de saneamento dos vales do Anhangabaú e da Várzea do Carmo em São Paulo do início do século XX foram realizadas sob os ideais positivistas da República proclamada em 1889, quando o País passa a considerar então a presença da população urbana como algo significativo. O ideário europeu foi a base conceitual de peso, trazida no século anterior pelos ensinamentos e técnicas sanitaristas e da engenharia que passam do Segundo Império brasileiro à República, se transformando a partir da década de 30. (CAMPOS:2002).

As novas ideias e as novas técnicas do século XIX sobre a gestão territorial transitavam entre a formação do ideário geográfico na Alemanha em processo de unificação, quando as discussões vinculadas às ideias de territórios nacionais se consolidavam pelos escritos dos geógrafos Humboldt, Ritter e mais tarde de Ratzel - este último, reconhecido como pai da Escola determinista geográfica (MORAES:2005), que abarcava as preocupações sócio sanitaristas desenvolvidas na França, a partir das barricadas de 1848. 6 As questões urbanísticas brasileiras fundam seus alicerces primordiais nestes dois veios, a geografia e o sanitarismo.

O saneamento se impondo na São Paulo na passagem dos séculos XIX ao XX como prioridade técnica, funcionou como uma justificativa para as urbanizações empreendidas nas áreas alagadiças da cidade, que, na verdade, tiveram como resultado a ocupação urbana de porções de terras devolutas e públicas, que poderiam ter tido uma outra função urbana dentro de pontos de vista mais abrangentes. Essas terras ou parte delas, ainda poderiam ter sido preservadas para um correto planejamento da interação urbe-águas... como estoques de bacias de contenção, o que de fato não aconteceu, devido ao estado da arte daquele tempo tecnológico...

Segundo a prática da época seria necessária uma polivalência técnica, explicitada pela criação da Escola Politécnica paulista em 1894, para tratar de implantações ferroviárias, portuárias e infraestruturais que se implantavam por todo o território nacional. Também se consolidavam neste tempo, as Comissões governamentais voltadas ao saneamento e aos cadastros, e posteriormente, as concessões de empresas estrangeiras, fazendo do Brasil um país também importador de tecnologias e serviços.

Assim, a associação entre os instrumentais legais de gestão urbana absorvidos dos países europeus, que buscavam, por lá, conter as revoltas populares urbanas (iniciadas em meados do século XIX), e as novas técnicas geográficas e topográficas, formavam um cabedal importante para a instrumentação da transição para a organização territorial da República brasileira.

Apesar deste progresso técnico, as contradições e as tradições clientelistas institucionalizadas dificultavam a implantação de um urbanismo mais abrangente, especialmente em São Paulo. Um urbanismo que ultrapassasse a escala de intervenções pontuais e de embelezamento executadas nas áreas específicas de conflito urbano. As dificuldades em relação à real definição da responsabilidade pela tutela das terras devolutas também são historicamente comprovadas pelo “vai e vem” da responsabilidade governamental sobre as mesmas durante os primeiros anos da República. Isso trouxe reflexos, até hoje não inteiramente equacionados, sobre a constituição da configuração urbana de São Paulo.

Após a promulgação da primeira constituição republicana em 1891, os poderes sobre as chamadas terras devolutas passam da União aos governos estaduais (LIMA:1935), sendo que, no caso particular do estado de São Paulo, o governo estadual depois, acabou repassando ao município, por força da Lei n. 1.038 do ano de 1898 - cinco anos depois, (MÔNACO, 1991), as terras devolutas localizadas num raio de seis quilômetros a partir da praça central, pois a cidade já fazia parte das povoações brasileiras com mais de mil habitantes.

Coincidentemente, a Comissão de Saneamento do Estado de São Paulo, criada em 1896, durou muito pouco, e extinguiu-se também em 1898... e a maior parte destas terras, chamadas devolutas, conforme a interpretação legal trazida por LIMA (1935), seriam terras inundáveis e insalubres, próximas aos cursos d´água na cidade.

Já na República de Getúlio Vargas, o estabelecimento do Código de Águas em 1934, representava claramente as preocupações com as definições legais das questões da propriedade das terras e das águas (KAHTOUNI:2004). Neste mesmo ano (1934), ocorreu outra devolução aos estados da tutela das terras devolutas através do decreto n. 6.473 de 30 de maio que diz:

> ..."São terras devolutas pertencentes ao estado de São Paulo " ex-vi" do art. 64 da constituição federal:
>
> I) – as que, tendo sido objeto de quaesquer concessões, não foram revalidadas ou legitimadas nos termos das leis anteriores,
>
> II) – as que, sendo de domínio público, não estiveram applicadas a qualquer uso público federal, estadual ou municipal,
>
> III) – os terrenos marginaes dos rios públicos e os accrescidos,
>
> IV) – as que não tiverem vertido para o domínio particular por qualquer dos modos do art.2º.."

Por sua vez, o Código de Águas, traçado sob a influência das ideais sanitaristas e republicanas francesas, classificou também a propriedade das águas no Brasil. Dividiram-se juridicamente as águas em águas públicas, águas comuns, águas particulares, águas comuns de todos. (NUNES,1980).

Em 1938, o artigo 3º do decreto-lei n. 852, de 11 de novembro definiu o seguinte conceito de águas públicas de uso comum:

> "São públicas de uso comum, em toda a sua extensão, as águas dos lagos, bem como dos cursos de águas naturais que, em algum trecho, sejam flutuáveis ou navegáveis por um tipo qualquer de embarcação" ...

Claramente, as transformações nas definições legais e mudanças do arcabouço específico de leis se refletiram nas configurações das urbanizações empreendidas ao longo dos rios, em seus trechos mais centrais ou estratégicos para a cidade.

No caso do Tamanduateí, por exemplo, sua navegabilidade cessou oficialmente e praticamente a partir das obras de retificação encadeadas pelo cel. Bresser em 1849, segundo diversas fontes. Desta forma suas águas passaram a não ser mais públicas desde então, perdendo-se aí a ideias das margens como terras devolutas, se recordarmos o decreto n. 6.473 de 30 de maio supracitado. (KAHTOUNI:2004:31). Apesar da maioria das fontes relatar que tais projetos e obras iniciam a partir de 1872 no governo do presidente

da Província João Teodoro Xavier, segundo Antônio Barreto do Amaral (1980:449) a retificação e canalização do Tamanduateí têm longa história, conforme relata:

> "...O primeiro estudo para retificação do rio, foi realizado pelo Major de Engenheiros Pedro Arbues Moreira em 1.821: mas, as obras projetadas, por serem de custo elevadíssimo, deixaram a ser executadas. Em 1.841, o presidente da Província, Conselheiro Miguel de Souza Melo e Alvim (v), determinou rigorosos estudos de retificação, incumbindo, desse trabalho o Engenheiro Carlos Abraão Brésser. Somente em 1.849, foi o projeto aproveitado pelo presidente, Conselheiro Vicente Pires da Mota, na lei n. 360, de 1.848, que autorizava o "encanamento", do Tamanduateí, e abertura de uma via pública à sua margem. Cortaram –se –lhe diversas curvas, nas baixadas de S. Bento, para a formação da atual rua 25 de Março, desviando –lhe o curso no trecho em que, da confluência do Anhangabaú dirigia – se para nordeste, através do Pari, até contornar o morro desse nome, para alcançar o Tietê. O canal aberto em direção nordeste cortou a Avenida Tiradentes, ao campo aterrado de Santana, estabelecendo ali a Ponte Pequena e demandando, em reta, a corrente do Tietê. Esgotada a parte extrema da várzea do Pari, continuaram, entretanto, as inundações nas várzeas de S. Bento, do Carmo e Cambuci, apesar das múltiplas valas cavadas no intuito errôneo, e sem resultado, de facilitar o escoamento das águas. Em 1.874, o Presidente João Teodoro Xavier tomou o encargo de melhorar a baixada do Carmo. Entre outras benfeitorias, 9 prolongou a Rua 25 de Março, da Ladeira do Carmo à ponte da Tabatinguera, arrasando grande parte do morro deste nome, que se projetava até cerca de oito metros do Hospital de Alienados (v) e desdobrando, em aterros homogêneos, acima da linha das inundações, da citada ponte até a Rua Lavapés. Construiu taludes no morro do Carmo e na rampa que descia, a prumo, sobre o Tamanduateí, rampa e taludes desaparecidos com o rebaixamento da Rua 25 de Março e alteamento da Várzea. Nas presidências do DR. João Alfredo Correia de Oliveira (v) e do Visconde do Parnaíba (v) , novos estudos foram feitos sobre o regime do Rio. Com o advento da República, renovaram – se os estudos, os mais notáveis deles pelos Drs. Antônio Francisco de Paula Souza e Teodoro Sampaio em 1.890 e pela comissão de Saneamento em 1.892, concluindo pela necessidade de proceder – se à completa retificação do primitivo leito, transformando–o em canal profundo e amplo, o que só poderia ser feito com o soerguimento dos terrenos marginais e a complementar retificação do rio Tietê. O álveo do Tamanduateí foi transferido, em linhas suavemente curvas, para o centro das várzeas e as suas margens levantadas em aterro homogêneo em toda sua extensão, desde as várzeas do Cambuci e da Glória. Em 1. 916, as obras de retificação do Rio Tamanduateí tiveram seu complemento definido, com a inauguração da última seção de seu leito artificial ..." (AMARAL:1980:449).

Portanto, a partir da implantação das linhas férreas Santos-Jundiaí e Central do Brasil, a expansão industrial se consolidou, em paralelo ao Tamanduateí, por questões econômicas e pela presença do caminho ao Porto de Santos. Essas frentes de expansão intraurbana, notadamente as terras devolutas, locais a serem saneados e revigorados dentro de uma posição que carregava em si um discurso científico da nova ciência urbanística, associada aos princípios da nova organização, sob forte influência da medicina e da engenharia,

significavam importante potencial para o estoque de terras centrais numa cidade onde as dificuldades de interligação e acessibilidade eram um fato.

As questões de terra estariam, sem dúvida atreladas às novas orientações e definições dadas às águas urbanas, configurando um novo diálogo rios-margens-ocupação nessas paisagens das antigas zonas industriais cujos resquícios hoje ainda são vistos ao longo do Tamanduateí, seguindo em direção ao ABC. Instalações industriais de tempos passados, usando o limite máximo dos terrenos marginais, atingindo diretamente o leito do rio com seus dejetos, não permitindo inclusive as tradicionais servidões de passagem. Assim, as margens, de terras devolutas, passaram no século XX a áreas particulares, com respaldo legal.

Figura 1: Planta da Cidade de São Paulo, 1897. Elaborada por Gomes Cardim

Fonte: Comissão IV Centenário/ Coleção de fac-similes de mapas antigos da cidade de São Paulo.

Por outro lado, tal questão das terras devolutas ainda hoje não foi aprofundada pelos estudiosos com a devida atenção, principalmente por falta de documentos sobreviventes em suficiência, quer por falta de interesse voltado para o assunto, pois que levantaria questões ainda não suficientemente esclarecidas no âmbito das ocupações "de fato". Registra-se aí a importância do trabalho de MONACO:1991, reunindo informações e vestígios da documentação republicana sobre o assunto e elaborando inclusive uma carta que reconstituiu a rede de terrenos devolutos da cidade situadas a um raio de seis quilômetros de distância do marco zero.

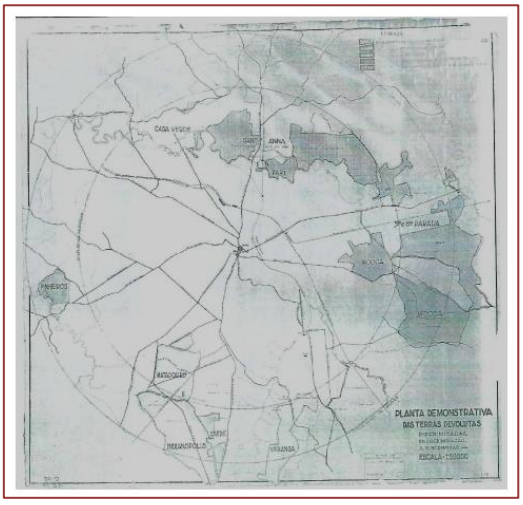
É fato notório também que parte dos documentos públicos, infelizmente se perderam, por falta de cuidados com arquivos e a outra parte conservou-se dispersa em cópias pertencentes a arquivos de grandes escritórios de engenheiros paulistanos dedicados à análise pericial de questões de terras, como no caso do arquivo do eng. Aguirra, posteriormente incorporado ao acervo do Museu Paulista e principal fonte do

pesquisador supracitado e algumas cópias localizadas em acervos de alguns antigos profissionais autônomos.

Em relação aos mapas oficiais da cidade, observando cronologicamente diversas cartas antigas de São Paulo, e entre elas, a de 1897 (apresentada no início da página anterior), podemos notar que a pressão imobiliária inicial incide claramente sobre as margens do rio Tamanduateí, paralelas ao curso da estrada de ferro Santos-Jundiaí, e primeiro eixo de instalação industrial da cidade, acompanhando os trilhos e abrindo frentes de expansão imobiliária da moradia popular, construída neste tempo por particulares para investimentos em uma renda proveniente de aluguéis.

Em meus arquivos particulares, constituídos a partir de algumas pesquisas realizadas há tempos em tradicionais escritórios de perícias em São Paulo, consegui recuperar uma planta, datada de1940, desenhada pelo setor de cadastro e desenho da prefeitura, que ainda delimitava grandes glebas de terras devolutas na cidade, cuja cópia, de um original encontrado em péssimo estado me foi cedida pelo engenheiro Jaime Carminatti. Estas terras situavam-se na região do Ibirapuera, da Mooca, de Pinheiros, Santana e na Zona Leste, conforme demonstra a Figura 2, abaixo.

Figura 2: Planta demonstrativa das terras devolutas da cidade de São Paulo, 1940 (PMSP)



Fonte: Arquivos Eng. Jairo Carminatti.

4. UM EXEMPLO ESTUDADO: AS TERRAS MARGINAIS AO TIETÊ CONCEDIDAS AO BANCO EVOLUCIONISTA

Todo esse processo anteriormente citado ficou muito claro, em um exemplo já estudado, o caso da concessão das terras agrícolas do Tietê para o Banco Evolucionista, na porção leste da metrópole e publicado no livro Cidade das águas (KAHTOUNI:2004). Tudo isso passa por um histórico específico levantado no processo judicial talvez ainda hoje pendente no Fórum paulistano.

Mas, se observarmos este fato, o das terras devolutas cuja concessão foi vendida ao Banco Evolucionista na virada dos séculos XIX-XX, o que parece um exemplo isolado, curiosamente pode ser atrelado à dificuldade de estabelecimento da propriedade imobiliária formal na região do extremo Leste de nossa cidade. Fato esse que, sem dúvida, dentro das expectativas de investimento capitalista calcado na propriedade fundiária

regular, forjou nessa região a sua inicial desvalorização fundiária e a marcaram como área de ocupações clandestinas e, portanto de urbanização de caráter mais popular ao longo do século XX.

Sabemos que, paradoxalmente, a porção Leste da cidade se destaca pela sua importância como histórico eixo de ligação da zona central de São Paulo aos caminhos do litoral e para a direção do Rio de Janeiro e que foi apontada por vários planos da cidade como uma direção de crescimento desejável, pelos aspectos físicos positivos que se apresentavam para as possibilidades de urbanização.

Se analisarmos o decreto n. 528, de 20 de maio de 1890, o mesmo permitiu a venda da concessão de terras consideradas devolutas a particulares, sob a justificativa da implantação de assentamentos agrícolas e núcleos de colonização. A contribuição deste instrumento legal à formação de verdadeiros territórios de etnias de imigração recente na cidade ocupando áreas devolutas adquiridas do próprio Estado é muito clara. Este decreto estabeleceu preceitos para a criação de chamados "núcleos coloniais", também denominados "núcleos agrícolas", apontados em plantas e relatos estudados.

Por exemplo, em decorrência deste decreto de 1890 ocorreu, no mesmo ano, a importante concessão oficial pelo Governo Provisório da República ao Eng. Medina, de terras devolutas à leste do centro histórico da cidade, compreendendo cerca de 50.000 hectares de terras 13 destinadas ao estabelecimento de núcleos agrícolas ao longo do Rio Tietê, compreendendo atualmente terras localizadas nos municípios de São Paulo, seguindo para Leste, e atingindo os municípios de Poá, Ferraz de Vasconcelos, Itaquaquecetuba e Mogi das Cruzes. Estas áreas envolviam também a conhecida região de São Miguel Paulista em nosso município, formada por antigos aldeamentos indígenas. Na época da concessão foi firmado um cronograma de fundação dos núcleos coloniais previstos, estabelecendo-se quatro anos para que as medições e demarcações fossem realizadas por territórios subdivididos no contrato inicial, às custas do concessionário.

Em 1891, por escritura pública datada de 23 de maio o eng. Ricardo Medina transferiu ao Banco Evolucionista todos os direitos adquiridos da União em relação aos territórios situados à margem do Tietê. Os serviços de medição e demarcação das terras iniciaram então em 24 de junho de 1891. Durante os trabalhos de medição e demarcação, tornados públicos por editais e por publicações no Diário Oficial do estado de São Paulo/ DOESP, não houve notícias de consideração de reclamações por posse ou propriedade das terras em questão. O ministro da Agricultura aprovou em 20/11/1891, desta forma, a transferência dos direitos e deveres da concessão ao Banco.

Em 1891, a transferência aos estados das terras devolutas da União, pela Constituição Federal explica porquê, em 1892 o Banco Evolucionista pagou o montante de vinte e cinco contos e oitocentos e vinte e cinco réis à Tesouraria Estadual, adquirindo finalmente parte das terras, já medidas e demarcadas. Em 14 de outubro de 1892 o Governo do estado de São Paulo expediu o título definitivo de propriedade de metade das terras, assinado pelo presidente do estado de São Paulo, Dr. Bernardino de Campos.

Tal contrato, concretizado pelo governo do estado de São Paulo em 1892, foi rescindido em 1901, juntamente com outros de mesmo tipo, mantidos somente os direitos adquiridos por títulos de propriedade expedido por governadores ou presidentes de estados. Antes disso, em 1895 a Câmara municipal de São Paulo acionou o Banco Evolucionista discutindo a propriedade destas terras.

Figura 3 : Título de cessão definitiva de terras assinado por Bernardino de Campos em 14/10/1892

INSPECTORIA DE TERRAS, COLONISAÇÃO E IMMIGRAÇÃO

ESTADO DE SÃO PAULO

Fonte : Bolsa Nacional de Imóveis.

A pendência jurídica instaurou-se e ainda em 1996, ao que se saiba, mais de cem anos depois, tramitava um processo no Fórum de São Paulo a respeito desta porção de terras, de patrimônio indefinido. Coincidentemente, nesta direção da várzea, nas porções mais distantes do centro da metrópole, ainda hoje os meandros do rio Tietê se mantém, e diversas atividades de exploração mineral ainda persistem, mantendo-se nas áreas mais urbanizadas uma ocupação irregular, que já é considerada tradicional.

5. A ENGENHARIA COMO FATOR DE CONTROLE E DIRECIONAMENTO DA OCUPAÇÃO URBANA NAS ÁREAS DE CONFLITO

Os conflitos entre as condições naturais das várzeas e a ocupação humana em nossa cidade ficaram cada vez mais patentes, principalmente nas épocas de cheias. As enchentes, a presença dos rios e córregos, enfim, se transformaram num problema de vulto para a cidade, que se tornou em cem anos o centro da principal área metropolitana do País, assentada justamente numa região de muitas cabeceiras e fundos de vale.

Os conflitos entre a população urbana e os rios da cidade se acentuaram e transparecem desde o início das intervenções governamentais nas questões vinculadas ao saneamento a importância do controle da ocupação destas áreas, que poderiam se transformar em importantes focos de doenças. A retificação e a urbanização paisagística dos trechos mais centrais se impuseram no século XX como soluções inevitáveis para os fundos de vale, dentro das novas concepções da engenharia sanitária.

Na virada da República, depois dos trabalhos de retificação do Tamanduateí, em 1893 a Municipalidade inicia um processo de controle das vazões do rio Tietê ao mesmo tempo em que o Governo do Estado formula um plano de retificação assinado pelo engenheiro José Antônio Fonseca Rodrigues, pela secção central da Comissão de Saneamento do Estado, extinta em 1898. No entanto, estes planos não vingam imediatamente. Conflitos entre autarquias pela execução de seus planos associam-se aos conflitos pela tutela das terras marginais aos rios.

As obras sobre as áreas de conflito se traduziram durante muitos anos em pequenos aterros, canalizações e criação de espaços públicos gerados a partir do saneamento e aterrado de diversos córregos, nascentes e tanques, que passam a ser realizados pela municipalidade desde o início do século XX, principalmente na região central da cidade.

Os planos de reurbanização e saneamento dos vales do Anhangabaú e da várzea do Carmo são finalizados pelo urbanista francês Bouvard em 1911, derivados de amplos debates de ideias liderados por Victor da Silva Freire[1] , importante engenheiro paulistano responsável pelo primeiro plano de melhoramentos para São Paulo, de 1907. (SIMÕES JR:1995).

Os trabalhos de Bouvard, concretizando os ideais de Vitor da Silva Freire sob uma linguagem mais eclética e parisiense, na São Paulo do princípio do século XX, convergiam com os primeiros trabalhos ingleses e norte-americanos de saneamento realizados pelas mãos de Olmsted e seus seguidores a partir de meados do século XIX. A engenharia sanitária se impõe como norteadora dos princípios urbanísticos para a cidade desde as primeiras intervenções.

Das pesquisas realizadas até o momento, se depreende que o final do século XIX foi marcado pela priorização de obras de retificações de leito dentro da cidade e já no século

[1] Victor da Silva Freire Junior (1869 – 1951) era nascido em Lisboa , onde cursou a Escola Politécnica, formando – se em 1888, vindo para o Brasil em 1895 , quando inicia seu trabalho na superintendência de Obras Públicas , sob a direção de André Rebouças , sendo nomeado a seguir chefe do 3 distrito do Serviço de Abastecimento de Águas e Esgotos das Cidades do interior. Entre 1897 e 1898 chefia o distrito de Santos na Comissão de Saneamento do Estado. (Simões Jr :1995: 161). A partir de 1899 é convidado a exercer o cargo de diretor da Diretoria de Obras Municipais de São Paulo, sob o mandato do prefeito Antônio Prado. Permanece no cargo por 26 anos. Foi o responsável pelo primeiro plano de melhoramentos urbanísticos da cidade, realizado entre 1907 e 1911, do qual constaram a remodelação das várzeas do Carmo e do Anhangabaú, conforme os projetos do arquiteto francês Joseph Antoine Bouvard, de 1911.

XX, além das preocupações sanitaristas e de embelezamento do centro da metrópole cafeicultora surge a prioridade da utilização hidroelétrica dos recursos hídricos, visando o desenvolvimento da industrialização na cidade de São Paulo. Esta estratégia se concretizou, através da construção de reservatórios regularizadores das vazões do rio, mais afastados do núcleo urbanisticamente consolidado. A necessidade de geração de energia logo se impôs como a maior prioridade a partir do processo de intensa industrialização da cidade, propiciada por inúmeros fatores, e o abastecimento de água, as questões de saneamento e a poluição dos recursos hídricos passaram para um segundo plano de preocupações, ainda na primeira metade do século XX, nos anos 20.

Em seu relatório de 1905 sobre o abastecimento de água em São Paulo, Saturnino de Brito (BRITO,1905) previa, inclusive, a possibilidade de utilização do Rio Tietê como manancial, preconizando a necessidade de sua preservação contra a poluição. No entanto, a opção foi por mananciais externos à área urbanizada na época, o que possibilitou que realmente ficassem em segundo plano os cuidados com a hidrografia próxima às áreas urbanizadas ou passíveis de urbanização mais rápida.

Porém, justamente na década de 20, o conhecido projeto de Saturnino de Brito[2] para a retificação do rio e utilização das margens do Tietê foi apresentado à municipalidade. O projeto considerava a retificação e a canalização do rio, a construção da barragem e da eclusa da Penha, e a construção de mais quatro barragens nas adjacências dos seguintes locais: Vila Maria, Rudge Ramos, Nossa Senhora do Ó e Osasco.

Por outro lado, o Relatório da Comissão de Obras de Saneamento da Capital (RAMOS:1926), já alertava em 1926 para uma situação de risco a que se expunha toda a população paulistana, dizendo:

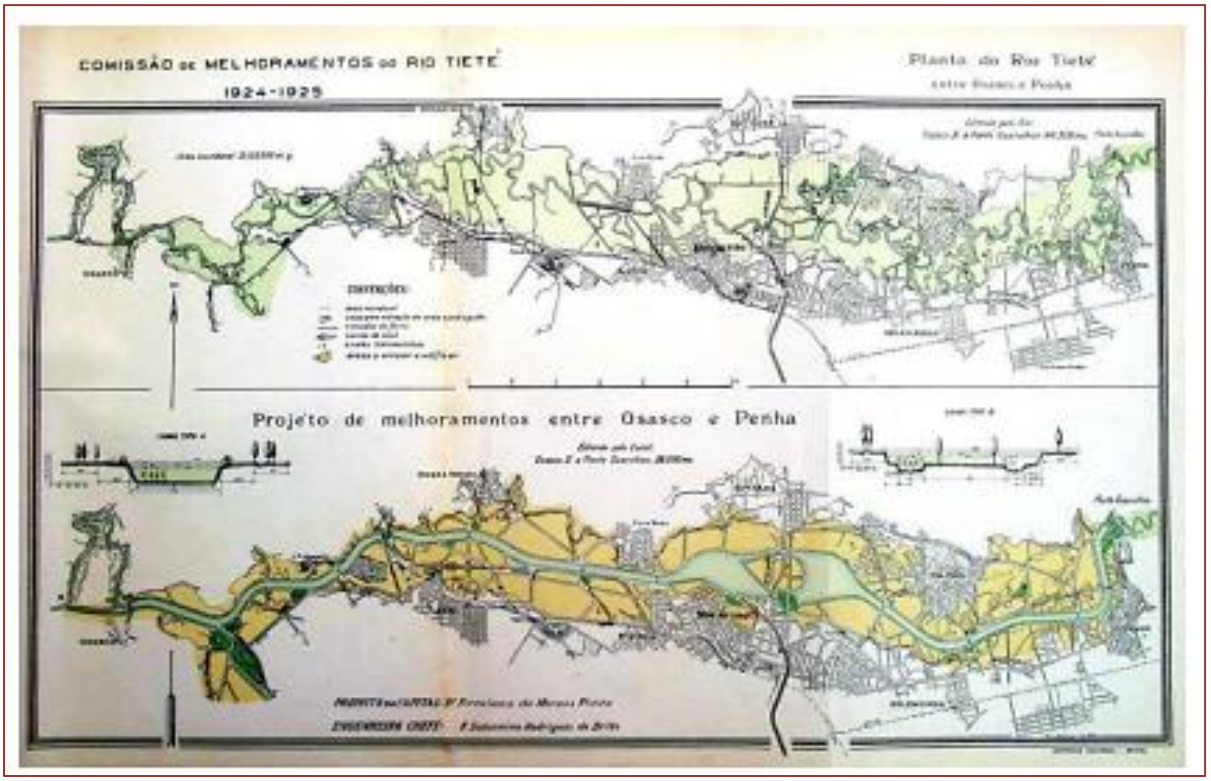
> "... para se avaliar o grau de poluição a que se atingiam as águas do rio Tietê basta dizer que nas estiagens baixa às vezes a 10: 1 a relação do volume do rio para o volume de esgotos. Descarregam os coletores de esgotos, diariamente, ao rio Tietê cerca de 30 toneladas de matéria sólida que se deposita no fundo e nas margens. Formam –se bancos imundos que dificilmente são resolvidos pelas enchentes do rio e ficam a descoberto durante as estiagens criando-se assim para a população da cidade uma situação intolerável..."

Em 1925/26, Saturnino de Brito organizou um primeiro relatório sobre a situação do rio Tietê na cidade de São Paulo, para a Prefeitura do Município, propondo um projeto para sua retificação no trecho que cortava a cidade em nome da referida Comissão de Melhoramentos.

[2] Saturnino de Brito, membro brasileiro da "Association Generále des higyenistes et tecniques municipaux de France, Algerie- Tunisie, Belgique, Suisse et Grand Duchê de Luxembourg" destacou-se por ter desenvolvido planos para o saneamento de diversas cidades brasileiras a partir de 1896 (Belo Horizonte, Rio de Janeiro, Santos, João Pessoa) e teve também trabalhos realizados ou somente projetados na cidade de São Paulo. Em 1905 apresenta o trabalho intitulado "Abastecimento de Águas em São Paulo" a fim de subsidiar o planejamento da ampliação do aproveitamento dos mananciais que poderiam servir à Capital. Em 1923/24 participa da organização da Comissão de Melhoramentos do Rio Tietê da Prefeitura Municipal de São Paulo, assumindo a sua presidência

Neste projeto predomina a proposta de urbanização das áreas dos meandros do rio Tietê após a retificação, legando pequena porcentagem à implantação de áreas públicas de lazer. As áreas em amarelo/sombreadas eram destinadas à urbanização.

Figura 4 Plano de Saturnino de Brito para a várzea do Tietê, tendo assinalado em amarelo as áreas a urbanizar

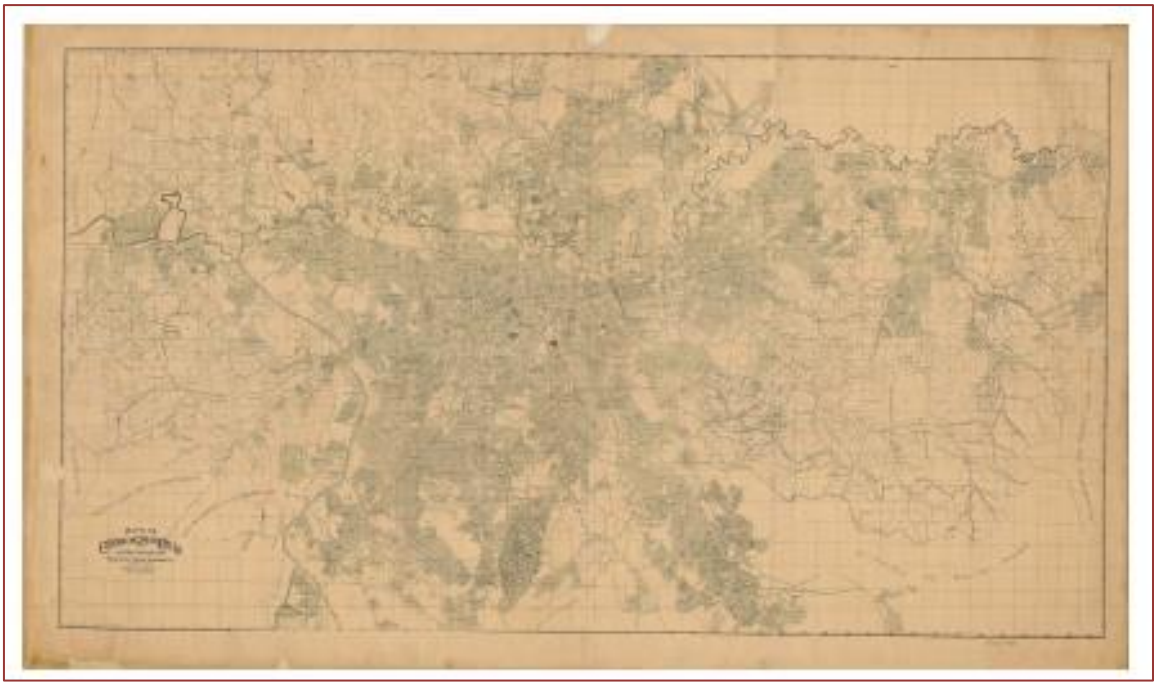


Fonte: DAEE,1982.

Já na década de trinta, a cartografia paulistana demonstra que a cidade já se tornava um significativo núcleo industrial, alongando-se pelo eixo do Rio Tamanduateí, e em paralelo à faixa da ferrovia para o Rio de Janeiro – em continuidade com os núcleos vizinhos de São Caetano e Santo André, também expandindo-se em direção ao porto de Santos.

Na opinião do professor e geógrafo Langenbuch (LANGENBUCH:1971), o trinômio ferrovia – terreno grande e plano – cursos d'água foi determinante para a implantação das indústrias ao longo das várzeas na formação e configuração de nosso território metropolitano, principalmente nas primeiras décadas do século XX. Este geógrafo desenvolveu importante estudo sobre a expansão urbana através dos subúrbios paulistanos ligados à ferrovia e o processo de metropolização da cidade, segundo ele iniciado desde a década de 40. Esta configuração está claramente demonstrada na "Planta da Cidade de São Paulo e municípios adjacentes" elaborada pela The São Paulo Tramway Light and Power em 1943, que nos traz em detalhes os novos loteamentos, ainda entremeados por zonas de ocupação agrícola ou rural, representando a ferrovia a rede hídrica em destaque.

Figura 5 – "Planta da Cidade de São Paulo e municípios adjacentes" elaborada pela The São Paulo Tramway Light and Power (1943)



Fonte: SMUL ACESSO http://smul.prefeitura.sp.gov.br/historico_demografico/img/mapas/1943.jpg

Não só na região sudoeste, mas, conforme já descrito, principalmente ao longo do Tamanduateí, e em algumas parcelas da várzea do Tietê, foram implantadas muitas indústrias, respondendo às contingências do declínio da economia cafeeira e guerras mundiais, que abriram a possibilidade de investimentos no setor industrial, associando a isso as possibilidades e vantagens locacionais da cidade de São Paulo associada à presença do potencial energético através da exploração dos recursos hidroelétricos organizada pela Companhia canadense "*Light and Power*".

Em relação ainda às obras hidráulicas no rio Tietê, somente a partir dos anos quarenta é que foram iniciadas as obras pretendidas pelo projeto de Saturnino de Brito, com alterações posteriores em alguns trechos de canalização pela prefeitura do Município de São Paulo. As obras perduraram por décadas, com interrupções até a década de sessenta, quando o DAEE Departamento de águas e energia elétrica, assumiu a direção das obras de melhoramentos do rio Tietê, completando a retificação e canalização do rio em nosso município somente no início da década de setenta, após a inauguração, em 1969, pela municipalidade, das avenidas marginais ao Rio Tietê.

Estas vias, hoje consideradas geograficamente inadequadas, foram, na época, "festejadas" inclusive por alguns intelectuais da universidade, que viam essa medida como uma das soluções para os problemas urbanos da cidade de São Paulo. Na verdade, além das tradicionais preocupações do saneamento, que predominam nas justificativas iniciais dos primeiros relatórios técnicos que propõem as obras, foi claramente permitida a ocupação das áreas liberadas pelos meandros do rio, a despeito das ideias de aproveitamento de terrenos como áreas verdes da cidade, esboçadas em diversos projetos mais recentes.

O fato é que as intervenções pensadas sobre o Tietê foram constantemente proteladas em detrimento da urbanização ao longo do retificado Tamanduateí, sucedidas depois pelas dos terrenos marginais e da várzea do Rio Pinheiros, rio mais distante da urbanização consolidada, que foi o principal alvo de interesses de aproveitamento econômico de recursos hídricos para geração de energia através da sua inversão de curso e também por companhias de urbanização de empreendimento tipo "cidades-jardins" nas áreas adjacentes. A esses interesses se associaram fatos como o das grandes enchentes de 1929, que foram as maiores da história deste rio, e afetaram também as vazões do Tietê, por razões claramente elucidadas pelo importante trabalho de prospecção da professora e geógrafa Odette Seabra (SEABRA:1987) que relaciona o histórico acontecimento hídrico à atuação e interesses sobre o rio Pinheiros, da Companhia Light em São Paulo.

Grandes obras hidráulicas visando garantir a geração energética já estavam presentes no estado de São Paulo desde o início do século, como demonstra a construção pioneira de Parnaíba/1901 (o primeiro aproveitamento hidroelétrico da extinta Companhia Light), associado a uma usina de geração energética atualmente denominada Edgard de Souza, que passou por inúmeras modificações, visando "sobrelevar" as águas e desviar o curso do Rio Pinheiros. (KAHTOUNI;2005).

Foram nesta mesma época iniciadas pela Companhia Light and Power as obras do reservatório Billings , com o propósito de geração de energia na Usina Henry Borden, em Cubatão , vinculada à reversão do rio Pinheiros, que estava em processo de canalização antes de qualquer providência no Tietê, para alimentar os geradores da Usina do Alto da Serra, quase concomitantemente às obras da Usina de Rasgão em 1924, executada pela mesma Companhia ... Ainda hoje, com a "Operação Saneamento", metade da vazão da Bacia do Alto Tietê é revertida para Cubatão, o restante das águas do Tietê segue o curso normal para Oeste.

Durante a década de quarenta também foi retificado o Rio Pinheiros e iniciadas as obras das duas elevatórias desse rio: Traição e Pedreira. A primeira, localizada próxima à atual Av. dos Bandeirantes e a segunda, no sopé do reservatório Billings. Em 1946, pelo Decreto n. 22.008 de 29 de outubro, ficou a Cia. Light autorizada a ampliar o aproveitamento hidroelétrico do Cubatão mediante várias obras, entre as quais a elevação da barragem existente no Rio Tietê, modificando o sistema da usina de Parnaíba e denominando-a Edgard de Souza. Tais trabalhos foram plenamente concluídos somente em 1954.

Em 1954, o slogan "A cidade não pode parar" se espalhava pelas ruas e pelos jornais. Após todas as experiências europeias que praticamente fizeram transladar ao quadro inicial de uma cidade esparsa e de núcleo "rururbanos" onde se implementaram indústrias extrativas e primitivas, a cidade de São Paulo vivia momentos de plena falta de políticas de controle em relação ao seu processo de industrialização inicial inaugurado a partir de 1929. A opção pelo chamado "progresso a todo custo" protelava as questões ligadas à situação de poluição e degradação dos recursos hídricos da cidade para um outro momento. A dinâmica empreendida na cidade a partir da década de trinta, foi primeiramente esboçada pelo "Plano de Avenidas" de Prestes Maia para os anéis mais centrais, e neles se inspirou a transformação dos recursos hídricos em suportes para vetores viários possíveis na malha urbana em expansão.

Estes aconteceram ao longo das décadas posteriores, tomando os terrenos ripários, por força de desapropriações que se justificavam pela associação entre o pretendido saneamento e a premente necessidade de novas avenidas.

Tendo sido iniciados os trabalhos de Saturnino de Brito para o Tietê, sob a forte influência da engenharia franco-belga do professor Imbeaux[3] , que calculava a construção de perfeitos canais de seção geométrica para rápido escoamento das águas, que depois assumiram formas de galerias fechadas no subsolo implantadas nas primeiras décadas do século XX, em diversos bairros centrais de nossa cidade, modernizados pelo Plano de Prestes Maia e suas continuidades.

Somente a partir de 1970 os problemas ambientais advindos da industrialização intensa e acelerada são equacionados de uma forma mais objetiva e o estado passa a agir de uma forma mais dirigida para a saúde ocupacional ou para o controle da poluição propriamente dito, sem maiores discussões. Apesar dos problemas ambientais em relação aos recursos hídricos em questão estarem presentes desde o início do século XX, só tendo se agravado durante décadas em função do crescimento populacional e de seus impactos, aliaram-se a isso a baixa velocidade e dificuldades na implementação das verdadeiras obras de saneamento, como a simples condução de esgotos a estações de tratamento, obras que já levam mais de 50 anos em nossa cidade....

Em relação especificamente ao controle de qualidade das águas, somente em 29 de junho de 1973 foi promulgada a Lei Estadual n. 118, que autorizava a constituição da antiga Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental – CETESB, no estado de São Paulo. A CETESB foi então criada em 1973, com a finalidade de controlar principalmente a poluição das águas no Estado de São Paulo. A referida lei, em seu artigo 2. inciso VI atribuiu à CETESB a responsabilidade pela manutenção de um sistema de informações e divulgação de dados de interesse da engenharia sanitária e da poluição das águas.

O monitoramento da qualidade das águas no sistema teve início somente em 1974 e que essa qualidade das águas em nosso Estado como um todo tem representado gradativamente níveis piores através dos índices utilizados para análises das amostras de águas brutas, em diversas bacias. Pouco tempo depois foi promulgada a Lei Estadual n. 997, 31 de maio de 1976, que dispunha sobre o controle da poluição do meio ambiente. A primeira legislação de proteção aos mananciais na Região Metropolitana de São Paulo foi criada também na década de setenta. (Lei estadual n .898 de 18 de dezembro de 1975). Acreditou-se que o rigor das novas leis e imposições formais resolveriam a situação, fruto de um processo histórico. Não foi o que ocorreu.

É fato que os instrumentos e organismos cuja função é o controle e a monitoração da qualidade das águas são bem recentes em relação aos impactos que a urbanização e as alterações humanas trouxeram sobre a nossa hidrografia, especialmente no trecho estudado, o alto curso de uma importante bacia, onde se revela a riqueza do recurso através da geomorfologia estudada por AB´SABER:1956, que foi sendo intensamente ocupada ao longo de mais de 2 séculos.

As medidas efetivas de controle são levadas a efeito numa situação de degradação fortemente instaurada já pelo processo de ocupação e de utilização da terra, associados ao sistema hídrico pré-existente. A priorização da aquisição de terras, da industrialização e da geração de energia formaram o quadro de transformações incidentes sobre o triste destino de nossos rios.

[3] Professor em Paris, da École Nationale des Ponts e Chaussés, autor de diversos tratados sobre hidráulica editados na virada dos sécs. XIX-XX , influenciou fortemente os estudos e propostas de Saturnino de Brito, escrevendo, inclusive a apresentação do trabalho ‘ Notes sur le Trace Sanitaire des Villes”, da autoria deste engenheiro brasileiro, também seu aluno.

Nossos cursos d´água ficaram, diante desse processo, poluídos e escondidos sob ruas e avenidas, depois de um primeiro momento, em que os cálculos de vazão não esperavam o vertiginoso crescimento das impermeabilizações e a possibilidade tão próxima de superação destes cálculos. E assim se fizeram, a, partir destas ideias pioneiras, muitas novas avenidas, depois sobre leitos hídricos, que passaram a ocupar o subsolo, como a Av. Nove de Julho, que encobriu o córrego Saracura, a Av. Henrique Schaumann, que encobriu o córrego Verde, e também a avenida Pacaembu, e muitas outras na cidade.

Ao findar do século XX, as grandes enchentes de 1º de abril de 1999 foram anunciadas nos jornais, mostrando a volta do leito do velho Anhangabaú, escondido sob o túnel, como catástrofe ocasional. Na verdade, tratou-se da reação da natureza das águas do rio, tentando reocupar o seu próprio lugar geográfico. (KAHTOUNI:2003).

Essa é apenas uma parte da história. Não se pretende aqui, nestas poucas páginas, esgotar o assunto. O intuito de trazê-la é ampliar o leque de reflexões sobre esses fatos, para que se discuta o processo de configuração da nossa cidade à luz de outras incidências, incluindo neste aporte a relação entre seu cidadão e a natureza anteriormente presente, no Lugar onde se assentou a maior metrópole do nosso país, e diante do que se pretende para seu futuro ambiental.

REFERÊNCIAS

[1] AB´SABER, A. Geomorfologia do sítio urbano de São Paulo.1956. Tese de doutorado – FFCHL,USP, São Paulo.

[2] AMARAL, A.B.do. Dicionário da história de São Paulo. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 1980. (Coleção Paulística, v.19).

[3] BRITO, S. de. Abastecimento de água em São Paulo. São Paulo: Secretaria da Agricultura,1905.

[4] COSTA. L.A.M. O ideário urbano na virada do século – o engenheiro Theodoro Sampaio e as questões territoriais e urbanas modernas. São Carlos: Rima, 2003.

[5] CAMPOS, C. de. São Paulo pela lente da higiene: as propostas de Geraldo de Paula Souza para a cidade de São Paulo (1925-1945). São Carlos: RIMA/FAPESP, 2002.

[6] COMISSÃO DE OBRAS DO SANEAMENTO DA CAPITAL. Relatório correspondente ao ano de 1926. São Paulo: 1927.

[7] DAEE; Comportamento hidráulico do rio Tietê entre a penha e a barragem Edgard de Souza, São Paulo: Secretaria estadual de obras e meio ambiente, 1982

[8] KAHTOUNI.S, Cidade das águas. Tese de Doutorado, FAUUSP, 2003.

[9] KAHTOUNI, S. Cidade das águas. São Carlos: Rima, 2004.

[10] KAHTOUNI.S. As primeiras vilas barrageiras paulistas como reflexos da organização da infraestrutura e da rede urbana no território. Revista Desígnio FAUUSP (São Paulo), São Paulo, v. 01, n.04, p. 123-135, 2005.

[11] KAHTOUNI, S. Paisagem e infraestrutura no espaço da sociedade. São Carlos: Rima, 2016

[12] KAHTOUNI, S. São Paulo, a city of water. Cambridge Scholars Publishing,2023

[13] HUDSON, K. World industrial archaeology. Cambridge: Cambridge University Press,1979.

[14] LANGENBUCH, J.R. A estruturação da grande São Paulo. Rio de Janeiro: IBGE,1971.

[15] LIMA, C.R. Terras devolutas: história, doutrina e legislação. Porto Alegre: Globo,1935. MARX. M. Cidade no Brasil: terra de quem? São Paulo:Studio Nobel,1991

[16] MÓNACO, R. As terras devolutas e o crescimento na cidade de São Paulo (1554 a1930).1991. Dissertação de mestrado – FAUUSP, São Paulo.

[17] NUNES, A. de P. Código de águas: noções preliminares e definições. São Paulo: Revista dos Tribunais, 1980.

[18] PROOST DE SOUZA, S.K. Sistemas de engenharia como fatores de mutação ambiental e paisagística no Vale do Tietê. 1993. Dissertação de mestrado. FAUUSP: São Paulo.

[19] RAMOS, T. Relatório da Comissão de obras de saneamento da capital. São Paulo:Secretaria da Agricultura, 1926.

[20] RAMOS, T. Relatório da Comissão de obras de saneamento da capital. São Paulo: Secretaria da Agricultura, 1927.

[21] SEABRA, O. Nos meandros dos rios, nos meandros do poder – Tietê e Pinheiros: valorização dos rios e várzeas na cidade de São Paulo, 1987. Tese de doutorado- FFCHL/USP, São Paulo.

[22] SIMÕES JR., J.G. O setor de obras públicas e as origens do urbanismo na cidade de São Paulo, 1990. Dissertação de mestrado- FGV, São Paulo.

[23] ----------. Anhangabaú: história e urbanismo. 1995. Tese de doutorado – FAUUSP, São Paulo.

[24] TELLES, P.C. da S. História da engenharia no Brasil. Rio de Janeiro: Clube de Engenharia/ Clavero, 1994, vols. 1 e 2

[25] ZMITROWICZ, W. As obras públicas de engenharia e a sua função na estruturação da cidade de São Paulo. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da USP, 1984.

Capítulo 15

Estudos de confiabilidade: análise do tempo de vida útil de feixes tubulares de trocadores de calor

Jancler Adriano Pereira Nicácio

Resumo: Este artigo abordou a aplicação de ferramentas estatísticas na análise de confiabilidade de feixes tubulares de trocadores de calor do tipo casco e tubos pertencentes a uma unidade de hidrotratamento de diesel de uma refinaria de petróleo. O objetivo geral da pesquisa foi propor uma modelagem do tempo de vida útil de feixes tubulares dos trocadores de calor, os quais estão sujeitos a mecanismos de dano como corrosão e trincamento. A amostra desta pesquisa foi composta por 46 feixes de trocadores de calor, que foram inspecionados durante as paradas programadas de manutenção, entre os anos de 2004 até 2021. Após uma análise descritiva da amostra, foram empregados métodos paramétricos e não-paramétricos para analisar a variável resposta de interesse, o tempo até a falha dos feixes tubulares. Os resultados obtidos pelos métodos paramétricos indicaram que o ajuste dos dados às diversas distribuições consideradas não ocorre de forma adequada, muito possivelmente devido às características particulares dos dados amostrais obtidos. A modelagem pela distribuição de Weibull, amplamente utilizada em estudos na área de confiabilidade, indicou um parâmetro de forma de (α = 1,61776) e um parâmetro de escala de (γ = 208,586), apresentando uma estimativa para o tempo médio até a falha de 186,8 meses e mediana de 166,3 meses. A análise do tempo de vida útil empregando-se o estimador não-paramétrico de Kaplan-Meier indicou uma estimativa para o tempo médio até a falha de 139,1 meses e mediana de 181,6 meses. Os ajustes obtidos indicaram que os métodos não-paramétricos obtiveram melhor adesão aos dados amostrais da pesquisa. As limitações desta pesquisa envolveram a pouca quantidade de dados explorada, devido a unidade ter passado por apenas três paradas de manutenção até o presente momento; e o fato de a detecção da falha ser possível apenas em um intervalo específico e pré-determinado (momento da parada de manutenção), não possuindo uma característica puramente aleatória. Por fim, destaca-se que estes resultados não podem ser extrapolados para outras unidades ou outros tipos de equipamentos, visto que, as características de corrosão e as condições operacionais são específicas para cada tipo de unidade operacional.

Palavras-chave: Análise estatística, análise de vida útil, confiabilidade, feixes tubulares, trocadores de calor.

1. INTRODUÇÃO

A gama de equipamentos presentes em uma refinaria de petróleo é bastante vasta. Como exemplo, a refinaria de petróleo analisada neste trabalho, possui 100 torres de processamento, 660 vasos de pressão, 05 caldeiras, 770 trocadores de calor, 220 filtros, 10 esferas de armazenamento de gás liquefeito de petróleo, 170 tanques de armazenamento, 30 fornos e 2100 válvulas de segurança e alívio. As análises desenvolvidas neste estudo estão circunscritas somente ao tipo de equipamento denominado de trocador de calor.

Trocadores de calor são equipamentos responsáveis por transferir energia térmica de um fluido para outro sem misturar os dois fluidos. A transferência de calor em um trocador de calor geralmente envolve convecção em cada fluido e condução térmica através da parede que separa os dois fluidos. A direção da transferência do calor ocorre do fluido quente para o fluido frio, basicamente o fluido quente será resfriado e o fluido frio será aquecido (ZHI, et al., 2022).

Dentre os tipos de trocadores de calor empregados nas instalações industriais, o mais comum é o denominado trocador de calor de casco e tubos, que conta com um casco, em geral de formato cilíndrico, e com alguns tubos inseridos dentro dele para que ocorra a realização da troca dos fluidos. O conjunto destes tubos forma o chamado feixe tubular (TEMA Standard, 1998).

A área de confiabilidade atua por meio do emprego de análises estatísticas, que permite a identificação de possíveis problemas em equipamentos e componentes de uma planta industrial. De uma maneira simplificada, a confiabilidade é a probabilidade de que um equipamento opere com sucesso por um período especificado e sob condições operacionais determinadas. Neste cenário, a falha pode ser compreendida como a incapacidade do equipamento de exercer a função para a qual ele foi projetado e fabricado (LAFRAIA, 2001).

No caso específico do processo de operação em uma refinaria de petróleo, a inspeção dos tubos que compõem o feixe tubular de um trocador de calor de casco e tubos tem como objetivo verificar a existência de deteriorações que poderia comprometer o processo de troca de calor entre os fluidos.

Uma vez que o conjunto de tubos que compõe o feixe tubular pode ser considerado uma população de elementos que estão inseridos em um mesmo ambiente agressivo e degradante, a inspeção de feixes tubulares torna-se uma questão estatística, na qual é necessário selecionar uma amostra de tubos, inspecioná-los com os métodos e técnicas de ensaios não-destrutivos, visando a determinação da integridade operacional dos ativos (SABINO, 2008).

Dentro deste cenário, este trabalho se justifica, na medida que possui o propósito de realizar uma análise estatística dos dados das inspeções realizadas durante paradas de manutenção. Os resultados desta pesquisa podem auxiliar na determinação da alocação de esforços e recursos em equipamentos mais críticos do ponto de vista operacional e financeiro.

2. OBJETIVO

O objetivo geral desta pesquisa foi propor uma modelagem estatística do tempo de vida útil de feixes tubulares de trocadores de calor. Para que o objetivo geral se concretizasse foram elencados como objetivos específicos, a realização de análises estatísticas descritivas referentes à integridade dos feixes tubulares de trocadores de calor e a obtenção de modelos por meio de métodos estatísticos paramétricos e não-paramétricos referentes à análise da função de vida útil e da taxa de falha dos feixes tubulares de trocadores de calor.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. TROCADORES DE CALOR

Segundo (SADIK; LIU, 2002), um trocador ou permutador de calor é um dispositivo para transferência de calor eficiente de um meio para outro. Tem a finalidade de transferir calor de um fluido para o outro, encontrando-se estes a temperaturas diferentes. Os meios podem ser separados por uma parede sólida, de forma que eles nunca se misturem, ou podem estar em contato direto. Tais equipamentos possuem um design compacto resultando assim, em uma menor quantidade de material utilizado para a superfície de troca. O seu alto rendimento está aliado a seu baixo custo de manutenção.

Um permutador de calor é normalmente inserido num processo com a finalidade de arrefecer (resfriar) ou aquecer um determinado fluido. São amplamente usados em aquecedores, refrigeração, condicionamento de ar, usinas de geração de energia, plantas químicas, plantas petroquímicas, refinaria de petróleo, processamento de gás natural, e tratamento de águas residuais (SIKOS; KLEMES, 2010).

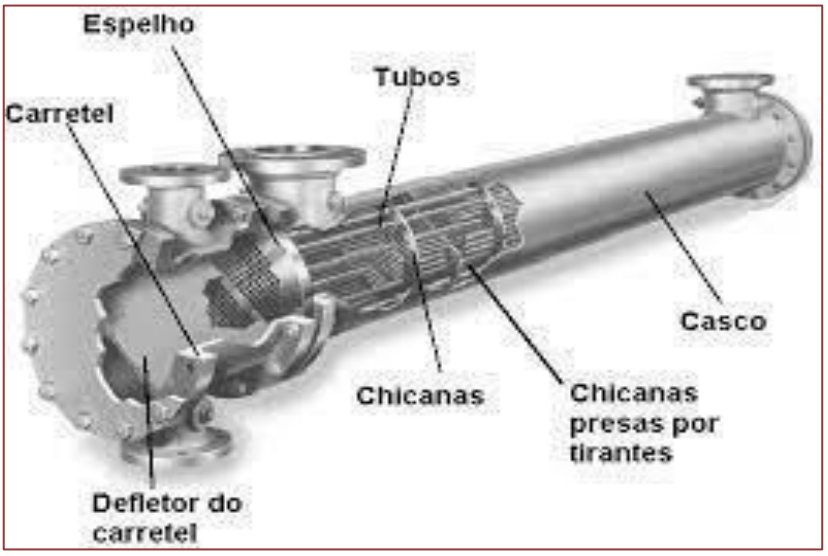
Para (OLIVEIRA; CARNEVAL, 2012), os trocadores de calor são usados em muitas indústrias, algumas das quais incluem: tratamento de águas residuais; sistemas de refrigeração; indústria de vinhos e cervejarias; indústria do petróleo, indústria química pesada e indústria alimentícia. A inspeção de integridade de trocadores de calor pode ser conduzida através de ensaios não destrutivos, como os ensaios IRIS (Sistema de Inspeção Interna Rotativa) e os ensaios de correntes parasitas.

3.1.1. TROCADOR DE CALOR TIPO CASCO E TUBOS

Segundo a (TEMA Standard, 1998), os trocadores de calor do tipo casco e tubos consistem em uma série de tubos. Um conjunto destes tubos contém o fluido que deve ser aquecido ou resfriado. O segundo fluido corre sobre os tubos que estão sendo aquecidos ou resfriados de modo que ele possa fornecer ou absorver o calor necessário. O conjunto de tubos é chamado feixe de tubos ou feixe tubular e pode ser feito de vários tipos de tubos.

As principais partes integrantes do trocador de calor do tipo casco e tubos são: o casco, o feixe tubular ou tubos, o carretel, conforme indicado na Figura 1. A função do casco é conter o feixe tubular, servir de elemento de resistência estrutural é, por onde se escoa o fluido que irá passar externamente aos tubos do feixe tubular.

Figura 1 – Principais componentes de um trocador de calor do tipo casco e tubos



Fonte: Página da empresa awpengenharia na Internet, 2022.
Disponível em: <https://www.awpengenharia.com.br/inspecao-trocador-calor>

A função do feixe tubular é agregar diversos tubos de pequeno diâmetro por onde irá escoar o fluido que irá passar em seu interior, este elemento fica alojado dentro do casco do trocador de calor. Por fim, a função do carretel é servir de elemento de vedação das extremidades do trocador de calor, dando vazão aos fluidos de trabalho e fluido de arrefecimento. Em relação aos materiais dos tubos, a designação ASTM refere-se às normas de especificações de materiais da *American Society for Testing and Materials*.

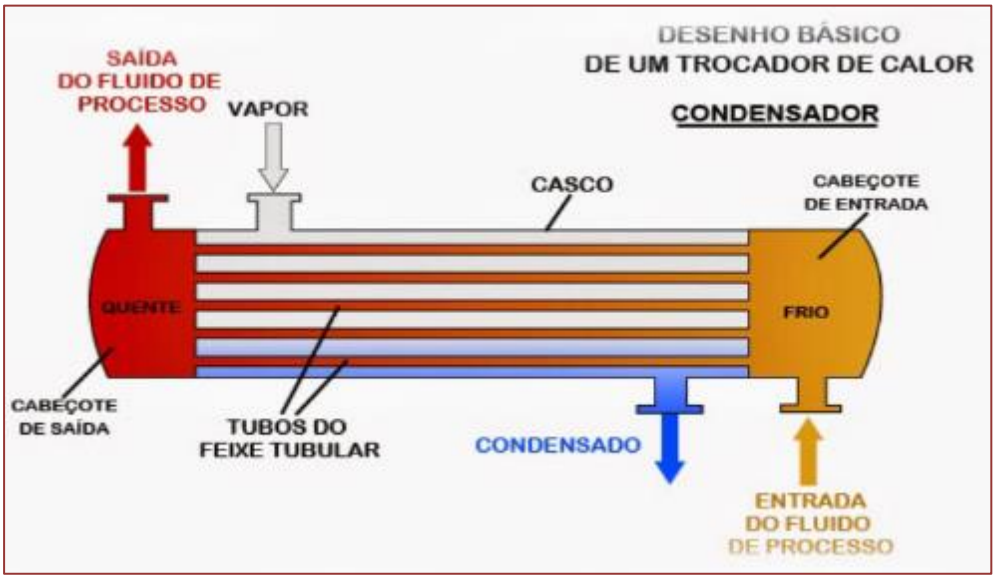
Os trocadores de calor podem possuir poucos ou vários tubos (até 50.000, por exemplo), podendo estes serem de materiais ferromagnéticos ou não. Estes tubos podem ser retos, curvos ou trançados, desta forma, exigindo uma boa quantidade de tipos de sondas para inspeção a ser realizada pelo interior de cada tubo (YASMAL, 2023).

Os defeitos mais preocupantes são cavidades (pitting) nas paredes internas e externas do tubo, corrosão, trincas axiais, trincas circunferenciais, principalmente junto às placas finais (espelhos), erosão e perdas de material. É importante a detecção destes defeitos antes que os tubos apresentem vazamentos que poderão provocar perda de pressão interna comprometendo a eficiência de funcionamento ou até colapso total do trocador. No caso de indústrias químicas e petroquímicas, estes defeitos poderiam contaminar os produtos (SIKOS; KLEMES, 2010).

A técnica de inspeção adequada vai depender da configuração dos tubos, do tipo de materiais e tipos de defeitos. A técnica das correntes parasitas normalmente é empregada para inspeções em tubos de material não ferromagnético, enquanto para tubos de material ferromagnético é empregada a técnica IRIS, uma derivação do ensaio de ultrassom (MADUREIRA et al., 2004).

A Figura 2 exemplifica o sentido de escoamento dos fluidos em um trocador de calor do tipo casco e tubos.

Figura 2 – Sentido de escoamento em um trocador de calor casco e tubos



Fonte: Página da empresa na Internet, 2022.

Disponível em: <https://www.trocadordecalor.com.br/trocador-de-calor>

3.2. ESTUDOS DE CONFIABILIDADE

No contexto da engenharia, a confiabilidade busca desenvolver modelos estatísticos que permitam representar os sistemas e elaborar previsões que suportem a tomada de decisão, visando a redução do número de eventos indesejáveis e o impacto que estes podem causar.

A Estatística é uma ciência que fornece métodos para a coleta, organização, descrição, análise e interpretação de um conjunto de dados. A análise de confiabilidade é uma área da estatística cujos métodos permitem estimar o tempo que um produto funcionará sem falhar, auxiliando no planejamento de gestão e manutenção (FREITAS; COLOSIMO, 1997).

De forma sucinta, define-se como Confiabilidade a probabilidade de que um item ou equipamento opere com sucesso por um período estabelecido e sob condições definidas de uso (BERGAMO FILHO, 1997). Ela mensura a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo. Aspectos importantes da confiabilidade de um sistema: sua natureza probabilística, sua dependência temporal, o que constitui sucesso ou insucesso e especificação das condições operacionais.

Confiabilidade se refere à capacidade de um sistema, equipamento, processo ou pessoa realizar uma função específica de maneira consistente e previsível ao longo do tempo, sob condições normais ou específicas, com a mínima probabilidade de falha. Em outras palavras, a confiabilidade implica que algo ou alguém pode ser contado para desempenhar sua função de forma consistente e com um baixo risco de quebras ou erros. É uma característica importante em várias áreas, como engenharia, tecnologia, gestão de qualidade e confiabilidade de dados.

A confiabilidade é uma área de estudo que se concentra na análise e garantia da capacidade de sistemas, equipamentos, processos e pessoas desempenharem suas funções de maneira consistente e previsível ao longo do tempo. Ela envolve a identificação, quantificação e mitigação de riscos de falha em diversos contextos. A confiabilidade é essencial na concepção e manutenção de produtos e sistemas, como automóveis, aeronaves, equipamentos industriais, eletrônicos e outros, garantindo que funcionem de maneira consistente e segura. Em gestão de qualidade, a confiabilidade envolve a garantia de que produtos ou serviços atendam consistentemente aos padrões de qualidade estabelecidos (SIKOS; KLEMES, 2010).

O levantamento de dados sobre um processo e o seu tratamento estatístico, quando analisados corretamente, contribuem para estimar a sua vida e o seu comportamento segundo (ASCHER; FEINGOLD, 1984). A variável resposta de interesse na análise de confiabilidade é o tempo até a falha, o qual é associado a uma função de falha que depende do tempo e, potencialmente, de variáveis explicativas (covariáveis) associadas ao problema.

Quando aplicada ao problema dos trocadores de calor, a análise de confiabilidade fornece a probabilidade de o trocador ter que ser retubulado, ou seja, retirado da operação (TRINDADE, 2012). A característica dos dados coletados dos feixes tubulares de trocadores de calor indicou que os feixes tubulares são considerados como sistemas não reparáveis, pois são descartados após a falha. Não ocorre o reparo já que todo o feixe tubular é substituído durante a parada de manutenção, não há retorno à condição de operação após a ação de manutenção.

Segundo (ROSS, 2010), os esforços na área de confiabilidade resultam no desenvolvimento de métodos probabilísticos e estatísticos para o tratamento prático das questões industriais com base em dados observados.

3.2.1. ANÁLISE DO TEMPO DE VIDA ÚTIL

Análise de confiabilidade ou do tempo de vida útil, é um ramo da estatística que estuda o tempo de duração esperado até a ocorrência de um ou mais eventos, tais como a morte em organismos biológicos ou a falha em sistemas mecânicos. Essa constitui uma das áreas da estatística que vem crescendo a partir da década de 1980 sob forte influência da evolução dos computadores e das técnicas estatísticas para analisar dados de sobrevivência (GIOLO; COLOSIMO, 2006). Em engenharia, este tema é denominado teoria da confiabilidade ou análise de confiabilidade; em economia é conhecido como análise de duração ou modelagem de duração e, em sociologia, como análise da história do evento.

O tempo de vida útil, também conhecido como vida útil, é a quantidade de tempo durante a qual um objeto, equipamento, produto, sistema ou ativo é considerado funcional, seguro e eficaz para uso dentro de seus parâmetros e condições de operação previstos. É o período em que se espera que o item permaneça em operação ou atenda ao seu propósito original antes de se deteriorar a ponto de requerer substituição, manutenção significativa ou não ser mais seguro ou eficaz (SILVA, 2012).

O tempo de vida útil pode variar consideravelmente, dependendo do que está sendo considerado. Por exemplo, em produtos eletrônicos, o tempo de vida útil pode ser relativamente curto devido às rápidas mudanças tecnológicas, enquanto em edifícios e infraestruturas, o tempo de vida útil pode ser de várias décadas (LAFRAIA, 2001).

É importante monitorar e gerenciar o tempo de vida útil de ativos, produtos e sistemas para garantir que eles funcionem com eficiência, segurança e economia durante o período previsto, planejando manutenção, substituição ou atualizações quando necessário. Isso é crítico em campos como engenharia, manufatura, gestão de ativos, construção e gerenciamento de projetos, onde o planejamento de ciclo de vida desempenha um papel fundamental na otimização de recursos e custos.

Os dados são caracterizados pela presença de observações parciais da variável resposta (censuras) que ocorrem quando o acompanhamento de alguns dos pacientes foi interrompido por alguma razão. Ou seja, os dados são ditos censurados quando alguns indivíduos envolvidos no estudo não "experimentam" o evento de interesse, ou seja, não "falham" até o fim do estudo (GIOLO; COLOSIMO, 2006).

Em estudos de confiabilidade, as "censuras" são uma técnica estatística usada quando a observação direta de todos os eventos de falha em uma amostra não é possível ou viável devido a várias razões, como limitações de tempo, custo ou recursos. A censura é frequentemente aplicada em estudos de confiabilidade para analisar a vida útil ou a taxa de falhas de produtos, sistemas ou equipamentos. A censura permite que os engenheiros e pesquisadores extrapolem as informações disponíveis para fazer estimativas sobre a confiabilidade e a vida útil de um produto ou sistema, mesmo quando a observação direta de todos os eventos de falha não é possível. Isso é particularmente útil em situações em que os testes de confiabilidade precisam ser interrompidos antes que todos os itens tenham falhado, ou quando a coleta de dados de falha é dispendiosa ou demorada. Técnicas estatísticas, como a análise de censura, são aplicadas para fazer essas estimativas de maneira confiável (SILVA, 2012).

Quando não existem censuras, a comparação pode ser realizada com técnicas usuais de análise de variância. No caso em que existem censuras, faz-se necessário o uso de métodos de análise de confiabilidade que possibilitam incorporar na análise estatística a informação contida nos dados censurados. Segundo (GIOLO; COLOSIMO, 2006), observações censuradas podem ocorrer por várias razões, como é o caso, por exemplo, da não ocorrência do evento de interesse até o término do experimento, no caso desta pesquisa, a não observação do evento falha nos tubos dos trocadores de calor.

Segundo (GIOLO; COLOSIMO, 2006), em análise de sobrevivência as censuras podem ser classificadas em três tipos:

1. Censura à direita: ocorre quando o tempo até a ocorrência do evento de interesse está à direita do tempo observado;
2. Censura à esquerda: ocorre quando o tempo até a ocorrência do evento de interesse está à esquerda do tempo observado;
3. Censura intervalar: ocorre quando é conhecido apenas o intervalo de tempo no qual o evento de interesse ocorreu, sendo o tempo exato de ocorrência desconhecido, ou de outra forma, quando não se sabe o tempo exato de ocorrência do evento de interesse, mas sabe-se que ele ocorreu dentro de um intervalo. Neste estudo, a censura intervalar seria o período entre as paradas de manutenção da planta industrial.

A censura à direita é a mais frequente na prática. As circunstâncias nas quais pode ocorrer este tipo de censura são várias. A censura à esquerda é o tipo de censura que ocorre com menor frequência na prática.

Os seguintes termos são comumente usados em análises de sobrevivência, e foram exemplificados para o contexto deste trabalho:

Evento - ocorrência de falha ou outra experiência de interesse, neste caso associado a um dano nos tubos dos trocadores de calor.

Tempo - Refere-se ao tempo em que o feixe tubular permaneceu em operação desde o início de operação até uma falha ou encerramento do período de acompanhamento do estudo. Importante ressaltar que os tempos estão relacionados à realização das paradas de manutenção.

Censura - Se um elemento de análise não falha durante o tempo de observação ele será descrito como censurado.

3.2.2. A DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

Em probabilidade e estatística, a distribuição de Weibull é uma distribuição de probabilidade que pode ser associada a uma variável aleatória contínua não negativa. É nomeada devido a Waloddi Weibull que em 1951 lançou um artigo descrevendo a distribuição em detalhes e propondo diversas aplicações (WEIBULL, 1951).

A distribuição Weibull, nomeada em homenagem ao engenheiro sueco Waloddi Weibull, é uma distribuição de probabilidade usada em estatísticas e engenharia para modelar a distribuição de tempos de vida de produtos, sistemas ou componentes. Waloddi Weibull, nascido em 1887 e falecido em 1979, era um engenheiro e estatístico sueco conhecido por seu trabalho na análise de dados de confiabilidade e pela criação da distribuição de Weibull.

A distribuição de Weibull é particularmente útil para descrever o comportamento de falhas ao longo do tempo. Ela pode ser aplicada a uma variedade de situações em que os tempos de vida de itens podem ser modelados usando uma função de densidade de probabilidade. A forma da distribuição Weibull pode variar, o que a torna flexível o suficiente para lidar com diferentes tipos de curvas de falha, como falhas iniciais, falhas constantes ou falhas que aumentam com o tempo (ROSS, 2010).

Essa distribuição é amplamente usada em análises de confiabilidade, engenharia, estudos de tempo de vida e em muitas outras aplicações em que a modelagem da distribuição de falhas é necessária para tomar decisões informadas sobre manutenção, substituição de equipamentos e qualidade de produtos (RINNE, 2008).

O campo de aplicações da distribuição de Weibull é vasto e abrange praticamente todas as áreas da ciência. Usando essa distribuição, realizou-se a modelagem bem sucedida de dados provenientes de grandes áreas de ciências física, biológica, social, saúde, ambiental e métodos baseados nesta distribuição são ferramentas indispensáveis para profissionais da engenharia de confiabilidade. Em geral, suas aplicações visam a determinação do tempo de vida médio e da taxa de falhas em função do tempo da população analisada (LAFRAIA, 2001).

Devido a necessidade de empresas da área de engenharia e tecnologia assegurarem a confiabilidade e caracterizarem a vida útil de seus produtos, originou-se o mercado da engenharia de confiabilidade no qual a análise de tempos de falha com base na distribuição Weibull aparece como um importante e poderosa ferramenta (LAFRAIA, 2001).

Segue abaixo uma compilação de exemplos com aplicações da distribuição de Weibull na área de confiabilidade de materiais e produtos (LIERTZ; OESTREICH, 1976): resistência à fratura do vidro; falha de compostos de fibra de carbono; falha em semicondutores e capacitores; confiabilidade de guias de ondas ópticos para cabos e variabilidade de capacidade de carga de helicópteros. A distribuição de Weibull permite a variação do risco no tempo, sendo uma generalização da distribuição Exponencial.

Seja T uma variável aleatória com função de distribuição Weibull, isto é, T ~ Weibull (α,γ), então as suas funções de densidade e de confiabilidade são, respectivamente,

$$f(t|\psi) = \alpha\gamma.e^{(-\gamma\alpha)}$$

$$R(t|\psi) = e^{(-\gamma\alpha)}$$

em que $t \geq 0$, $\psi = (\alpha, \gamma)$, $\alpha > 0$ é o parâmetro de forma e $\gamma > 0$ é parâmetro de escala.

A função de risco é definida da seguinte forma:

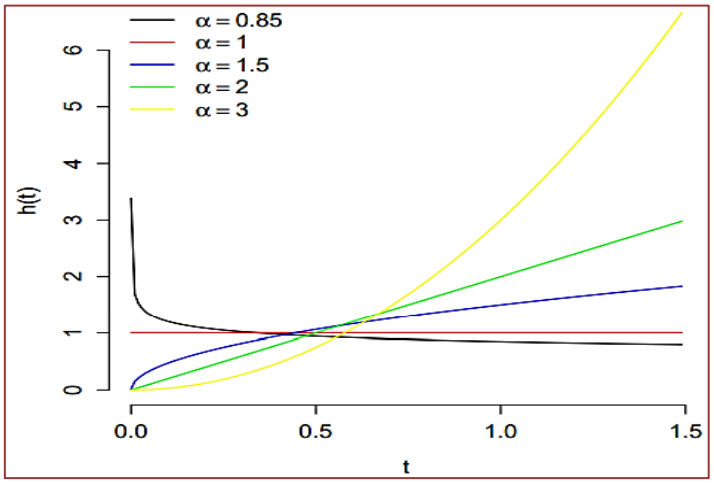
$$h(t) = \alpha\gamma t^{(\alpha-1)}$$

A função de risco, também conhecida como função de perigo (*hazard function*), é um conceito importante em estudos de confiabilidade e análise de sobrevivência. Ela descreve a taxa instantânea com a qual um evento de falha ocorre em um determinado ponto no tempo, dado que o item ou sistema sobreviveu até aquele ponto no tempo.

A função de risco é importante porque fornece informações sobre a taxa de falhas em um determinado ponto no tempo. Quando a função de risco é constante, isso indica que o item ou sistema está sujeito a uma taxa de falha constante ao longo do tempo. Quando a função de risco aumenta com o tempo, isso indica que a taxa de falha está aumentando à medida que o tempo passa.

O valor do parâmetro α é de grande interesse prático, uma vez que este determina a forma da função de risco, como ilustrado na Figura 3. Nesta figura, observa-se cinco cenários de funções risco associados à distribuição Weibull com parâmetro de escala γ fixado em 1 (γ=1). Nota-se que a cada valor do parâmetro de forma, a curva da função risco se comporta de maneira diferente. A função risco é decrescente se $\alpha < 1$, crescente se $\alpha > 1$ e constante para $\alpha = 1$.

Figura 3-Exemplos de funções risco associadas a distribuição *Weibull*



Fonte: Máquina, (2014, p. 10).

A distribuição de *Weibull* será considerada na análise dos tempos de falha dos trocadores de calor casco e tubos. A análise com base nesta ou em outra distribuição de probabilidade, é dita ser paramétrica, pois, os modelos apresentam parâmetros específicos que determinam diretamente as características das funções de densidade, de risco e de confiabilidade associadas, os parâmetros são estimados a partir dos dados observados para a variável aleatória T (ROSS, 2010).

O teste de aderência de Anderson-Darling, muitas vezes referido como o teste de Anderson-Darling, é um teste estatístico utilizado para determinar se uma amostra de dados segue uma distribuição de probabilidade específica. Este teste avalia a aderência dos dados observados a uma distribuição teórica, como a distribuição normal, exponencial ou qualquer outra.

O teste de Anderson-Darling compara a função de distribuição acumulativa empírica dos dados (a função que descreve a probabilidade de obter valores menores ou iguais a um determinado valor observado na amostra) com a função de distribuição acumulativa teórica da distribuição hipotética. Ele calcula uma estatística de teste que indica quão bem os dados observados se ajustam à distribuição teórica (RINNE, 2008).

O teste de Anderson-Darling é usado para verificar se os dados coletados em estudos ou experimentos seguem as suposições de distribuição necessárias para a aplicação de certas técnicas estatísticas. Se os dados não se ajustam bem à distribuição teórica, pode ser necessário considerar outras abordagens estatísticas ou modelar os dados de maneira diferente.

O teste de aderência de Anderson-Darling, segundo (FAERSTEIN, 2002), foi aplicado para verificar a adequação de distribuições paramétricas, dentre elas a Weibull, para a modelagem do tempo até a falha dos feixes tubulares, sendo as outras distribuições consideradas nesta pesquisas, as seguintes: Lognormal, Exponencial, Loglogística, menor valor extremo e normal.

A estatística do teste de Anderson-Darling mede o quão bem os dados seguem se adequam à distribuição de probabilidade. Para um conjunto de dados e distribuição especificadas, quanto melhor a distribuição se ajusta aos dados, menor será essa estatística (CARVALHO, 2011).

3.2.3. O MÉTODO DE KAPLAN-MEIER

O método de Kaplan-Meier, também conhecido como estimador de Kaplan-Meier ou curva de sobrevivência de Kaplan-Meier, é uma técnica estatística usada para estimar a função de sobrevivência em um conjunto de dados de tempo de vida ou tempo até a ocorrência de um evento. Esse método é frequentemente aplicado em estudos de confiabilidade, análise de sobrevivência e medicina para calcular as taxas de sobrevivência ao longo do tempo.

O método de Kaplan-Meier é especialmente útil quando se lida com dados censurados, ou seja, dados em que nem todos os eventos (por exemplo, falhas ou óbitos) tenham ocorrido no final do estudo ou período de observação. A técnica permite calcular estimativas não paramétricas da função de sobrevivência, que descreve a probabilidade de um evento não ter ocorrido até um determinado ponto no tempo (RINNE, 2008).

O método de Kaplan-Meier é um método não paramétrico, sendo o único que supõe que os indivíduos censurados se comportam do mesmo modo dos indivíduos acompanhados

até que ocorra o evento. Segundo (FAERSTEIN, 2002) o método permite a estimação da probabilidade de sobrevivência para cada período.

O processo de estimativa envolve a seguinte abordagem:

- Para cada evento observado (por exemplo, uma falha), o método de Kaplan-Meier calcula a probabilidade de sobrevivência, que é a proporção de eventos que não ocorreram até aquele ponto no tempo.
- As probabilidades de sobrevivência são multiplicadas para cada ponto no tempo em que um evento ocorreu, gerando a estimativa da função de sobrevivência acumulativa.
- A função de sobrevivência estimada é uma série de degraus que representa a probabilidade acumulativa de sobrevivência ao longo do tempo.

O método de Kaplan-Meier é uma ferramenta valiosa para a análise de dados de tempo de vida em que a função de sobrevivência precisa ser estimada, particularmente quando há dados censurados ou quando a suposição de distribuição paramétrica não pode ser atendida. Ele fornece uma maneira não paramétrica de entender como as taxas de sobrevivência evoluem ao longo do tempo e é amplamente utilizado em pesquisas em campos como a medicina, engenharia e estudos de confiabilidade.

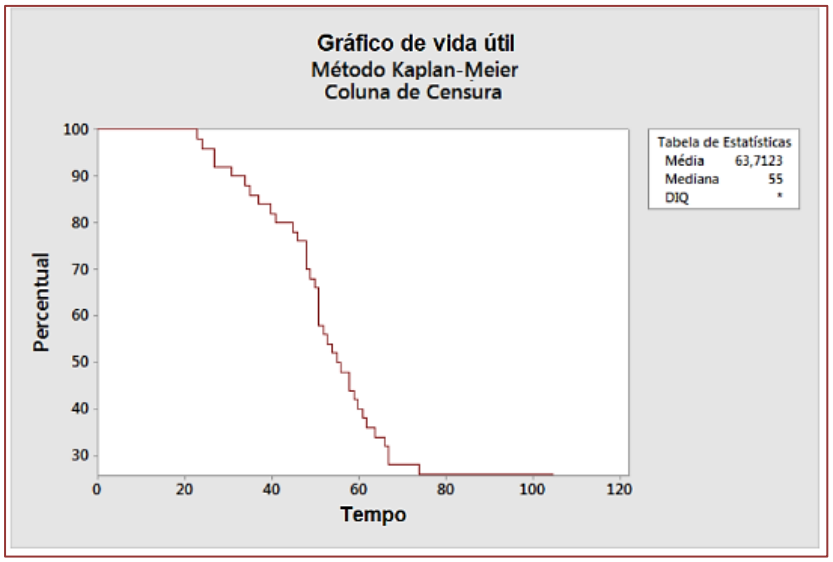
Para uma análise não paramétrica, o gráfico de confiabilidade é uma função de etapas, com etapas nos tempos de falha exatos. A curva descrita por R(t) é, teoricamente, uma curva suave, sem pontos angulosos, mas, geralmente ela é estimada por meio da curva de Kaplan-Meier (curva KM) que é uma curva com pontos angulosos que lembra uma escada (RINNE, 2008).

Em geral na curva de Kaplan-Meier:

- O eixo horizontal indica o tempo, que vai do zero (quando a observação começou a ser observada) até o último ponto de tempo observado.
- O eixo vertical indica a taxa de confiabilidade. No momento zero, 100% dos elementos equipamentos o evento, significando que todos os equipamentos se encontram operacionais.
- A linha sólida (semelhante a uma escada) mostra a progressão das ocorrências do evento. Uma queda vertical indica a ocorrência do evento.

A Figura 4 mostra um exemplo da aplicação da curva de Kaplan-Meier visando a determinação do tempo de confiabilidade de enrolamento de motor elétrico industrial.

Figura 4 -Curva de Kaplan-Meir aplicada em análise de enrolamentos de motores



Fonte: Software Minitab, versão 18, 2021.

Sua interpretação para o caso exposto, indica que para os enrolamentos de motor em funcionamento a 80°C, a probabilidade de sobrevivência até 55 horas é de 0,5. Em outras palavras, existe uma probabilidade de 50% de o enrolamento sobreviver até 55 horas. O próximo capítulo deste trabalho abordará a metodologia empregada na análise dos dados dos trocadores de calor tipo casco e tubos.

4. METODOLOGIA

A composição da amostra de pesquisa analisada foi determinada segundo os seguintes critérios de inclusão e exclusão:

1) Trocadores de calor liberados para inspeção interna durante as paradas programadas de manutenção da unidade de hidrotratamento de diesel, ocasião em que os equipamentos são abertos para limpeza e manutenção, permitindo-se a realização dos ensaios não destrutivos de IRIS ou de correntes parasitas nos feixes tubulares.
2) Tubos com diâmetro nominal de 19mm (3/4”) e de 25,4mm (1”) e com espessura de parede de 2,11mm (Birmingham Wire Gauge ou BWG 14). Critério adotado devido à elevada representatividade destes valores de diâmetros em unidades de processamento das indústrias química e petroquímica.
3) Não foram selecionados na amostra os trocadores de calor de sistema de bombas e de turbinas, devido ao fato de que a composição do material dos feixes tubulares ser em latão (uma liga composta por cobre e zinco) sendo praticamente imune e passiva aos processos corrosivos e aos mecanismos de danos detectados na unidade operacional.

A fonte de dados utilizada para a construção deste estudo correspondeu aos relatórios de inspeções de condições físicas concluídos no período de 2004 a 2022, no âmbito do setor de Inspeção de Equipamentos da empresa. Esses relatórios estão disponíveis no programa

de controle do plano de inspeção, assim como nas dependências do arquivo técnico do referido setor, sobre os quais se processou uma análise de conteúdo.

Com base nos relatórios de inspeção, foi aplicada a metodologia da análise de conteúdo, que basicamente é uma metodologia comum nas ciências sociais para estudos de conteúdo em comunicação e textos com uma perspectiva quantitativa, analisando numericamente a frequência de ocorrência de determinados termos, construções e referências em um dado texto, a análise de conteúdo foi proposta por (BARDIN, 1977).

Neste trabalho, a análise descritiva da variável resposta disponíveis na Tabela 2, foi realizada com o intuito de vislumbrar possíveis metodologias estatísticas que poderiam ser aplicadas para efeitos de estimação das funções de confiabilidade e de taxa de falha.

No passo de análise descritiva, também foram construídos gráficos e tabelas para as outras variáveis presentes no banco de dados, as quais caracterizam as unidades amostrais estudadas. Tais análises foram deixadas no Apêndice do trabalho, pois, não são essenciais para o compreendimento e aplicação das metodologias estatísticas selecionadas. A leitura dessas análises descritivas adicionais fica, portanto, como opcional ao leitor.

Após concluída a análise descritiva, verificou-se o ajuste de modelos paramétricos para estimação da função de confiabilidade e função taxa de risco. Algumas distribuições de probabilidade foram consideradas na análise, dentre elas as distribuições Lognormal, Loglogística, exponencial e Weibull.

Na sequência, a função de confiabilidade e a função taxa de risco também foram estimadas usando o método não-paramétrico de Kaplan-Meier, o qual não depende da pré-especificação de uma distribuição paramétrica para a variável resposta.

Após a etapa de levantamento e coleta dos dados, eles foram analisados usando o programa estatístico Minitab, versão 18.1 de 2021, (Minitab® Statistical Software). Nas subseções seguintes são detalhados os resultados obtidos em cada etapa de análise estatística.

O Quadro 1 mostra a descrição das variáveis extraídas dos relatórios de inspeção dos trocadores de calor da amostra analisada neste trabalho.

Quadro 1 - Descrição das variáveis coletadas

Variável	Descrição
Equipamento	Identificação numérica do equipamento
Descrição	Descrição da função do equipamento da unidade
Categoria NR-13	Enquadramento do equipamento na categoria da norma regulamentadora NR-13
Modelo TEMA	Enquadramento do trocador na categoria da norma de construção TEMA
Tipo de tubos	Configuração geométrica do feixe tubular
Material	Material de construção do feixe tubular
Diâmetro	Valor do diâmetro nominal dos tubos do feixe tubular

Quadro 1 - Descrição das variáveis coletadas (continuação)

Variável	Descrição
Esp. Nominal	Valor da espessura nominal (espessura de parede) dos tubos constitutivos do feixe tubular
BWG	Código de padronização de espessura nominal de tubos segundo norma britânica
Comprimento	Comprimento do feixe tubular
Quantidade	Quantidade de tubos que constituem o feixe tubular
Fluido tubos	Fluido que escoa na região interna aos tubos
Fluido casco	Fluido que escoa na região externa aos tubos
Data partida	Data da entrada em operação dos equipamentos
Ensaios realizados	Descrição dos ensaios não-destrutivos realizados no feixe tubular (Correntes Parasitas ou IRIS)
Resultados	Descrição dos resultados dos ensaios não-destrutivos realizados no feixe tubular (Correntes Parasitas ou IRIS)
Feixe retubulado	Descrição se o feixe tubular foi retubulado ou não
Tempo de operação	Descrição do tempo de operação do feixe tubular
Mecanismo de dano	Descrição do mecanismo de dano atuante no feixe tubular conforme norma americana API RP 571

Fonte: Banco de dados da inspeção de uma refinaria de petróleo, (2022).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A descrição dos dados coletados foi iniciada por meio da caracterização das unidades amostrais em termos das suas características de composição física, tipo de ensaio realizado no ato da manutenção e tipo de dano identificado. Como o foco diz respeito à análise da resposta de interesse, apresentamos no texto apenas as análises descritivas que envolvem esta variável.

A Tabela 1 mostra a determinação do número de retubulações às quais os feixes tubulares foram submetidos desde o início da operação da unidade operacional. Entre os profissionais de manutenção e as atividades realizadas no setor.

As informações referentes às retubulações (uma retubulação significa que ocorreu uma falha) dos feixes tubulares analisados indicam que 31 feixes tubulares não falharam na operação da unidade (cerca de 67,39%) e que cerca de 15 feixes (cerca de 32,61%) foram retubulados devido às falhas que ocorreram ao menos uma vez durante a operação da unidade de hidrotratamento de diesel no período analisado.

Tabela 1 - Número de retubulações observadas nos feixes tubulares

Feixe Retubulado	Contagem	Percentual(%)	Contagem Acumulada
Não	31	67,39	31
Sim	15	32,61	46
Total	46	100,00%	46

Fonte: Autor, 2022.

A Tabela 2 mostra a relação entre a ocorrência da retubulação nos tubos dos feixes versus os mecanismos de dano atuantes nos tubos. Nota-se uma concentração do dano perda de espessura, o qual, pode provocar alvéolos, pites ou furos ao longo dos tubos, com a conseguinte perda de contenção do fluido interno e a contaminação do fluido externo, com a perda de eficiência da troca térmica estimada em projeto. Foram retubulados apenas os feixes nos quais o mecanismo de dano, perda de espessura, estava atuante.

Tabela 2: Retubulação x possíveis tipos de mecanismos de dano atuante nos tubos

Feixe Retubulado	Perda de espessura	Perda de espessura e trincamento	Total
Não	25	6	31
Sim	15	0	15
Total	40	6	46

Fonte: Autor, 2022.

A Tabela 3 mostra a distribuição das espessuras de parede dos tubos dos feixes, que é uma função direta de seu diâmetro, sendo também uma medida padronizada. A espessura mais empregada neste caso, é a de 2,11mm de parede de tubo, o que corresponde ao diâmetro de ¾" ou 19,05mm, com cerca de 86,96% das ocorrências. A outra espessura empregada foi de 1,65mm de parede do tubos, para o diâmetro de 1", ou 25,40mm, o que corresponde a cerca de 13,04% das ocorrências.

Tabela 3: Distribuição da espessura de parede dos tubos

Espessura dos tubos (mm)	Contagem	Percentual(%)	Contagem Acumulada
2,11	40	86,96	40
1,65	6	13,04	46
Total	46	100,00%	46

Fonte: Autor, 2022.

A Tabela 4 mostra a distribuição dos diversos tipos de materiais de fabricação dos tubos dos feixes. Nota-se a concentração da especificação ASTM SA-179 (*Standard Specification for Seamless Cold-Drawn Low-Carbon Steel Heat-Exchanger and Condenser Tubes*) é de cerca de 78,26%.

Este é um aço carbono, que de forma sintética, é uma liga metálica, do tipo solução sólida intersticial com uma constituição de liga que confere ao aço o seu nível de resistência mecânica, dispondo de 0,008% a 2,11% de concentração de carbono em sua composição, denominado de soluto e o restante em ferro, elementos adicionais também estão

presentes, como o manganês, fósforo e silício. Em segundo aparece o aço inoxidável da classe austenítica nas versões ASTM SA-213/304L e ASTM SA-213/347.

Destaca-se que se trata de uma liga de ferro e cromo (entre 10% e 12%) que, em alguns casos, recebe adição de níquel, sendo um material resistente à corrosão. No caso, a especificação 304 é mais básica desta gama de materiais inoxidáveis, correspondente a um percentual de 8,70% da distribuição dos trocadores analisados. Já a especificação 347 é um aço inoxidável de matriz austenítica estabilizado ao nióbio com resistência à corrosão em altas temperaturas.

Tabela 4: Distribuição do tipo de material dos tubos

Material dos Tubos	Contagem	Percentual(%)	Contagem Acumulada
ASTM SA-179	36	78,26	36
ASTM SA-213/304L	4	8,70	40
ASTM SA-213/347	3	6,52	43
ASTM SA-213/T.11	2	4,35	45
ASTM B-668	1	2,17	46
Total	46	100,00%	46

Fonte: Autor, 2022.

A Tabela 5 mostra a distribuição dos diversos tipos de mecanismo de dano atuante nos feixes tubulares. De forma sucinta, mecanismo de dano é o processo de natureza física, química, metalúrgica ou mecânica que promove o dano ou a acumulação do dano em equipamento ou tubulação.

Percebe-se uma concentração de três tipos de mecanismos de dano presentes nos tubos dos trocadores de calor, que somados correspondem por 76,08% são eles: a ação corrosiva pela água de refrigeração que corresponde por cerca de 30,43%; a ação da corrosão sob tensão também com 30,43%; e a corrosão por água ácida e sulfetação com cerca de 15,22%.

Tabela 5: Distribuição do tipo de mecanismo de dano atuante nos tubos

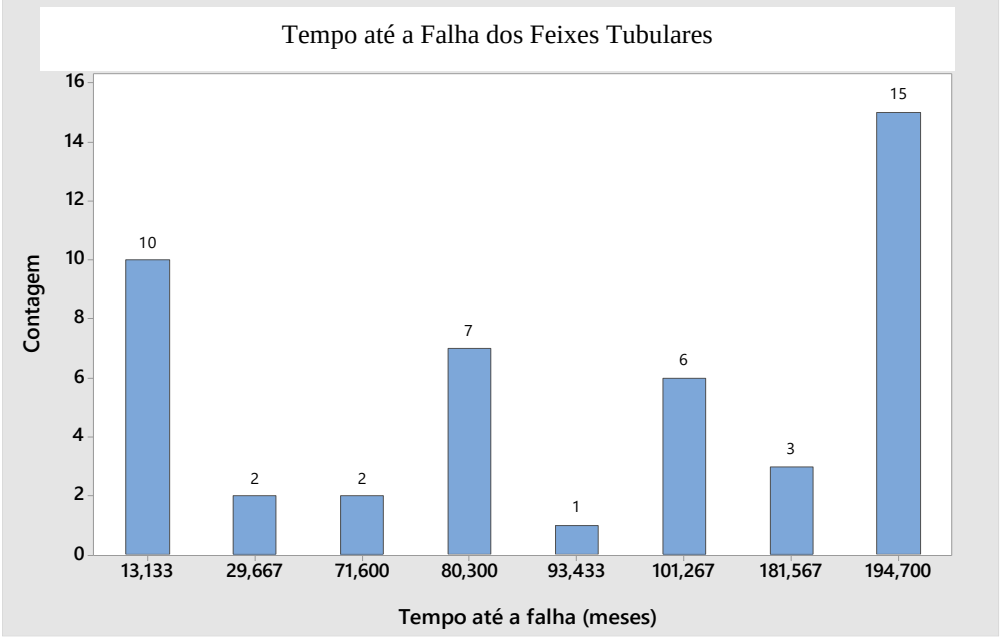
Tipo de Corrosão	Contagem	Percentual(%)	Contagem Acumulada
Corrosão por água de refrigeração	14	30,43	14
Corrosão sob tensão	14	30,43	28
Corrosão por água ácida e sulfetação	7	15,22	35
Corrosão por H_2S	3	6,52	38
Corrosão por NH_4HS	3	6,52	41
Corrosão por H_2S e NH_4Cl	2	4,35	43
Corrosão por NH_4HS e NH_4Cl	2	4,35	45
Corrosão sob tensão e H_2S	1	2,17	46
Total	46	100,00%	46

Fonte: Autor, 2022.

A Figura 5 mostra a distribuição do tempo até a falha dos feixes tubulares dos trocadores de calor analisados neste trabalho. Esta unidade de medida inclui apenas o tempo operacional entre falhas e não inclui os tempos de parada das manutenções. Como

exemplo, nota-se que 7 feixes tubulares precisaram ser trocados após 80,3 meses em operação. Um total de 26 feixes tubulares não falharam desde o início do estudo, o que totaliza 194,7 meses.

Figura 5 – Tempo até a falha dos feixes tubulares de trocadores de calor



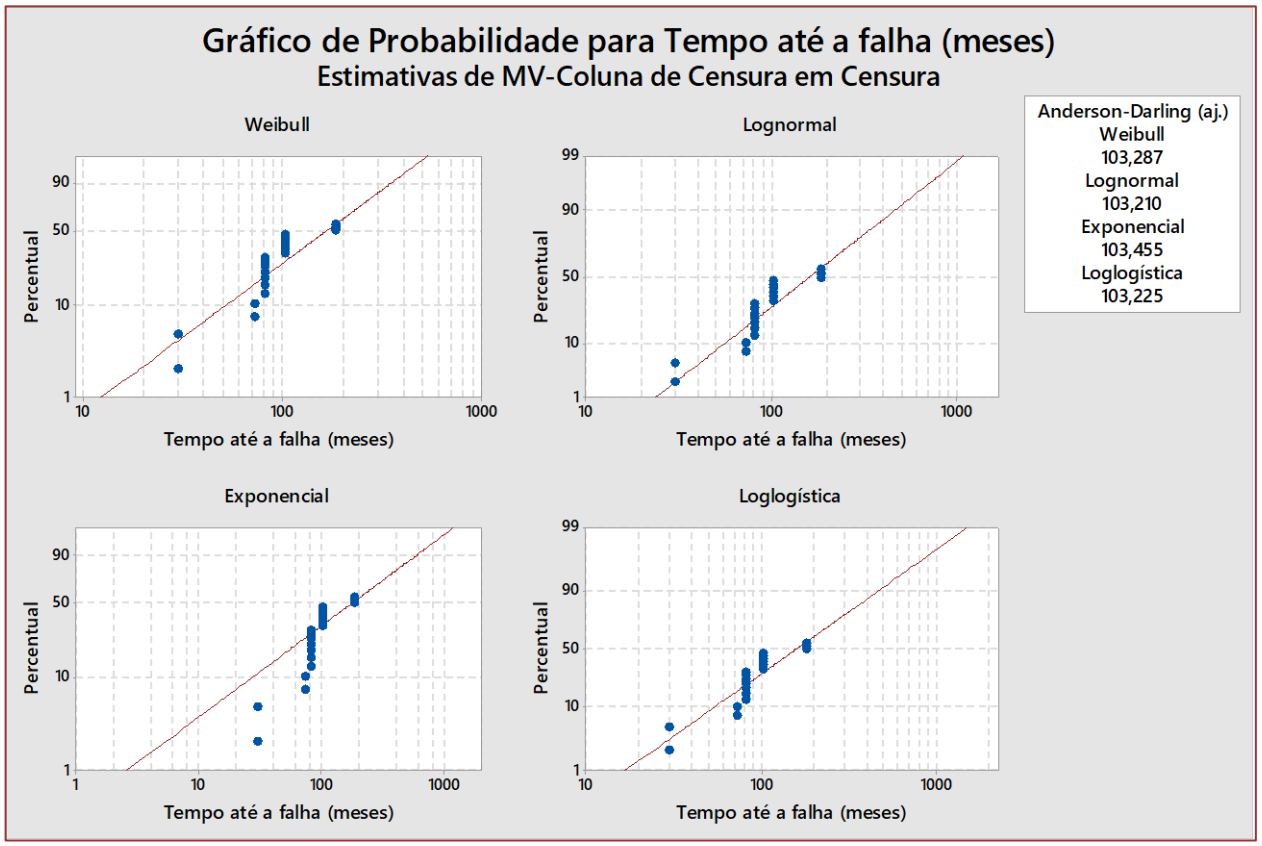
Fonte: Autor, 2022.

5.1. ANÁLISE PARAMÉTRICA DO TEMPO DE VIDA ÚTIL

Inicialmente, buscou-se verificar o ajuste de certas distribuições de probabilidade paramétricas. A Figura 6 mostra o gráfico de probabilidade do tempo até a falha dos feixes tubulares (em meses), em conjunto com as diversas distribuições adotadas visando a obtenção da melhor curva de ajuste dos dados. Nesta figura são apresentadas as análises para as seguintes distribuições estatísticas paramétricas: Weibull, Lognormal, Exponencial e Loglogística. Nota-se que a estatística do teste de Anderson-Darling apresenta valores elevados e relativamente próximos.

Isso indica que os modelos de distribuições paramétricas são similares quanto à aderência dos dados à estrutura paramétrica imposta por estes modelos e que, por seu valor elevado, os dados não se ajustam muito bem a estes modelos. Isso é corroborado pelo padrão dos gráficos apresentados, os quais comparam os quantis teóricos dessas distribuições com os quantis amostrais. Se os dados se adequam à distribuição teórica, os pontos deveriam estar variando aleatoriamente em torno da reta traçada. Isto não ocorre para nenhuma das distribuições analisadas.

Figura 6 – Ajuste das distribuições paramétricas aos dados amostrais

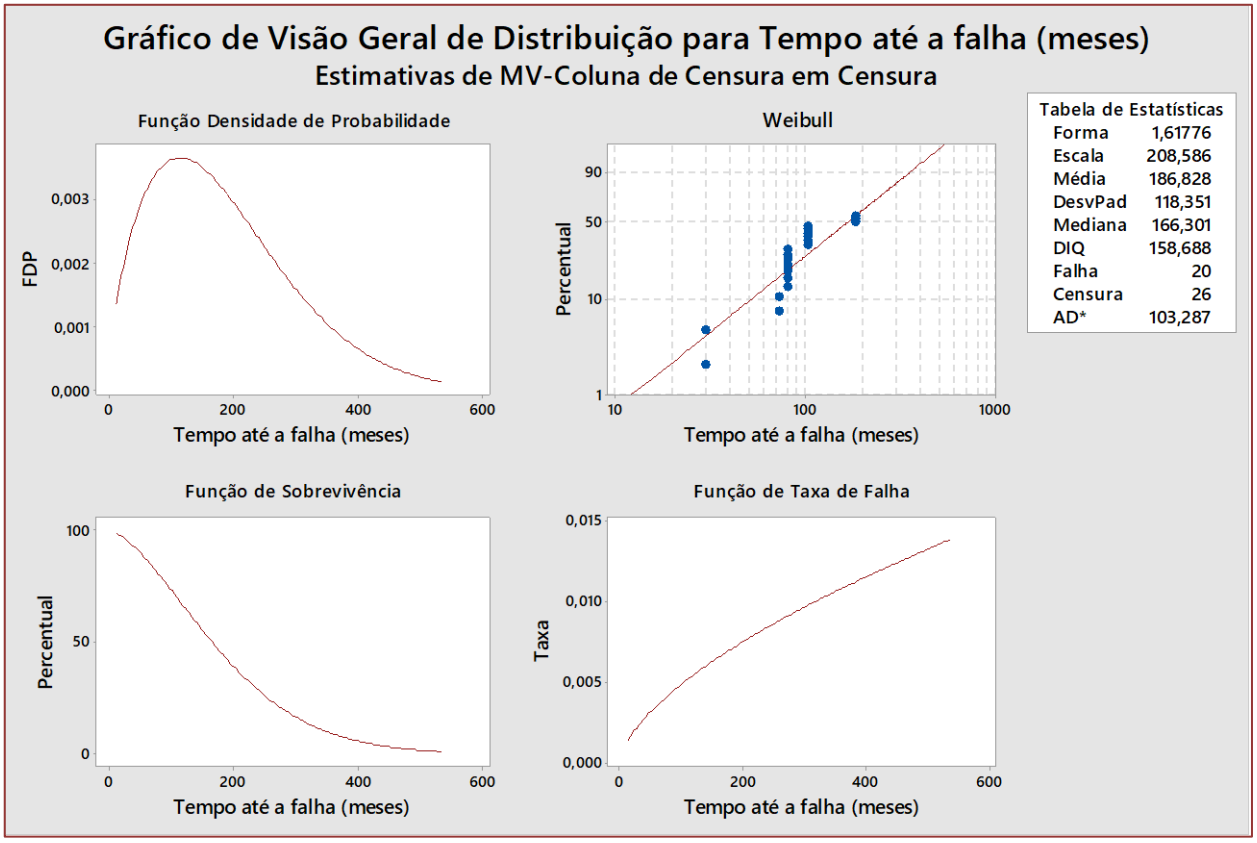


Fonte: Autor, 2022.

5.2. MODELAGEM DOS DADOS PELA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

A Figura 7 mostra o resultado da aplicação da distribuição de Weibull nos dados de pesquisa. Temos nesta figura a estimação da função densidade de probabilidade (FDP), função de confiabilidade, curva de ajuste dos dados a distribuição de Weibull e a função de taxa de falha. Foi selecionada a estimação pelo método de máxima verossimilhança e um nível de confiança de 95%.

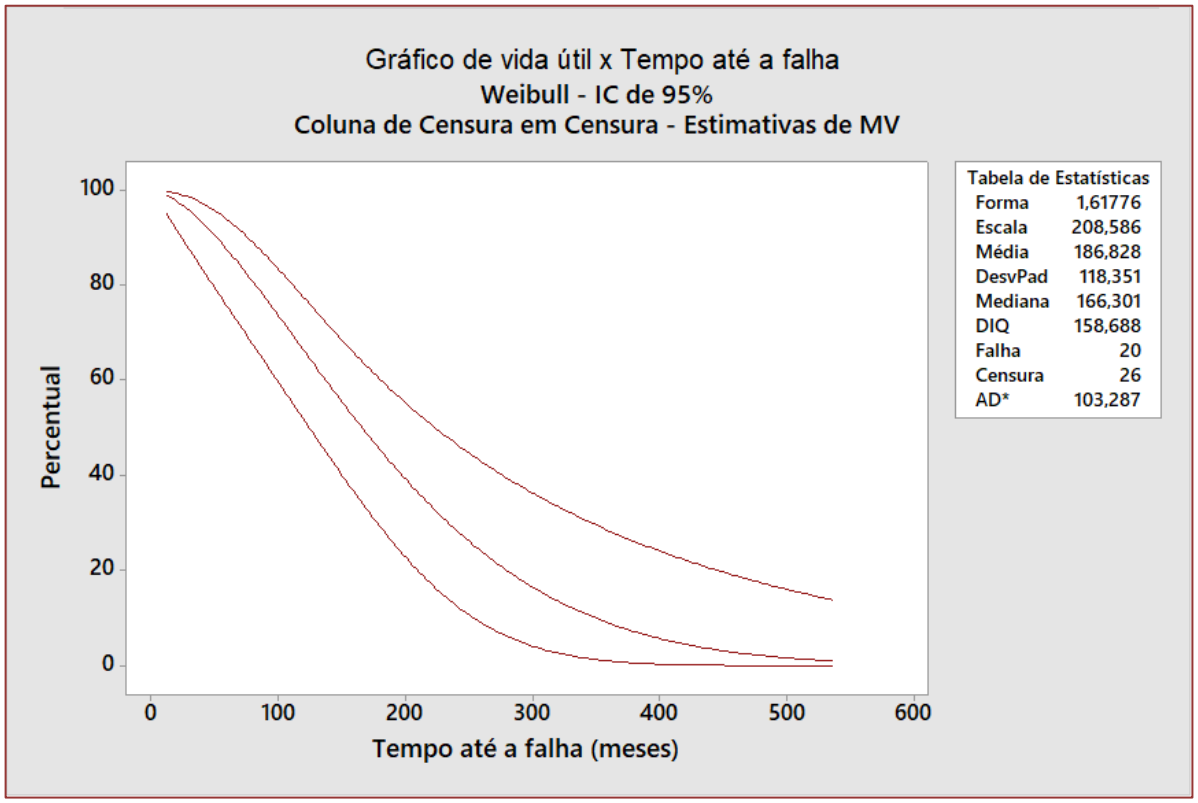
Figura 7 – Modelagem dos dados empregando a distribuição paramétrica de Weibull



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 8 mostra as curvas de confiabilidade do tempo até a falha, o qual exibe a porcentagem acumulada de itens que irão falham até um determinado instante específico de tempo. A linha central representa a porcentagem média até a falha estimada ao longo do tempo, a linha inferior conecta os limites inferiores de porcentagem de falhas e a linha superior conecta os limites superiores de porcentagem de falhas em cada ponto de tempo. Segundo o resultado do ajuste, por exemplo, a probabilidade de um feixe tubular permanecer em operação por mais de 200 horas é aproximadamente igual a 42% (IC-95%: [21%, 58%]), e permanecer em operação por mais de 300 horas é aproximadamente igual a 17% (IC-95%: [10%, 38%]).

Figura 8 – Gráfico da vida útil usando a distribuição de Weibull

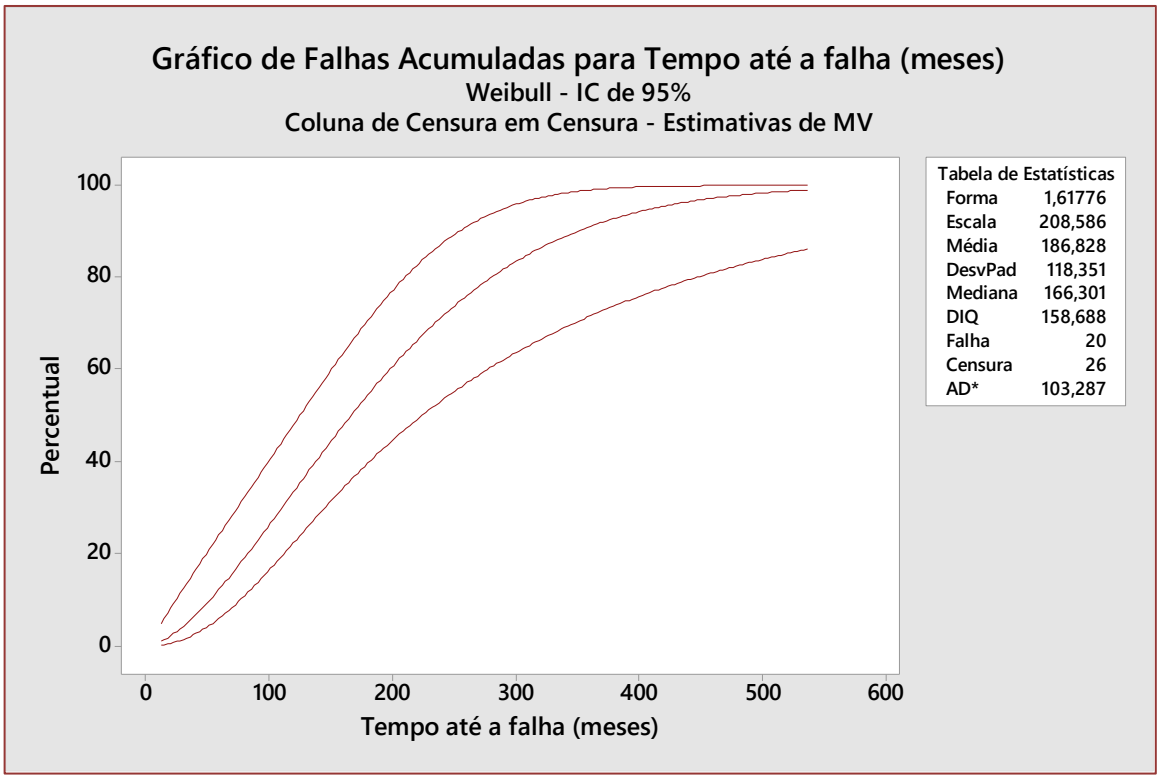


Fonte: Autor, 2022.

A Figura 9 mostra o gráfico da taxa de falhas acumuladas, o qual exibe a porcentagem acumulada de itens que falham até um determinado instante de tempo. A linha central representa a porcentagem de falhas acumuladas estimada ao longo do tempo, a linha inferior conecta os limites inferiores para a porcentagem de falhas acumuladas em cada ponto do tempo e a linha superior conecta os limites superiores para a porcentagem de falhas acumuladas em cada ponto de tempo.

Segundo o resultado do ajuste, por exemplo, a probabilidade de ocorrência de falhas de um feixe tubular com tempo de operação de 200 meses é de 60% (IC-95%: [42%, 76%]), aproximadamente, e permanecer em operação por mais de 300 horas é de 82% (IC-95%: [61%, 93%]), aproximadamente.

Figura 9 – Gráfico das falhas acumuladas usando a distribuição de Weibull



Fonte: Autor, 2022

A Tabela 6 mostra as estimativas dos parâmetros de forma e de escala da distribuição de Weibull. O parâmetro de forma (α) controla a posição da curva sobre o eixo das abscissas (eixo x) e o parâmetro de escala (γ) controla as dimensões que a curva assume, dada uma forma constante, à medida que o parâmetro de escala aumenta a curva tende a se tornar mais dispersa.

Desta forma, fica caracterizada a curva de distribuição paramétrica de Weibull aplicada aos dados desta pesquisa. Pontualmente, o parâmetro de forma assumiu o valor α = 1,61776 e o parâmetro de escala foi estimado como sendo γ = 208,586.

Tabela 6: Estimativas dos parâmetros da distribuição de Weibull

Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	Limite Inferior (IC de 95%)	Limite Superior (IC de 95%)
Forma (α)	1,61776	0,307746	1,11427	2,34876
Escala (γ)	208,586	30,5614	156,520	277,972

Fonte: Autor, 2022.

6. CONCLUSÕES

A proposta deste artigo foi analisar o tempo de vida útil dos feixes tubulares de trocadores de calor do tipo casco e tubos de uma unidade industrial de hidrotratamento de diesel de uma refinaria de petróleo. A amostra de pesquisa baseou-se na análise de 46 feixes

tubulares de trocadores de calor, que foram inspecionados por meio da aplicação de ensaios não-destrutivos durante as paradas de manutenção da referida unidade operacional, entre os anos de 2004 a 2021. Os 46 feixes tubulares compreendem os originais, incluídos na operação na data de instauração da unidade, além daqueles que foram incluídos ao longo do estudo por meio de retubulação de feixes que falharam (unidades que entraram no estudo após reparo completo de outra que foi retirada de operação).

Para fins de exemplificação de uso da metodologia, adotou-se a distribuição de Weibull para a análise por ser uma das mais empregadas na literatura em estudos de Confiabilidade e análise do tempo de sobrevivência. A modelagem pela distribuição de Weibull indicou um parâmetro de forma estimado em $\alpha = 1{,}61776$ e um parâmetro de escala de $\gamma = 208{,}586$), apresentando uma estimativa para o tempo médio até a falha de 186,8 meses e mediana de 166,3 meses. A análise do tempo de vida útil dos feixes tubulares empregando-se o método não-paramétrico de Kaplan-Meier permitiu a estimação da função de confiabilidade dos equipamentos sem a necessidade da especificação de uma distribuição paramétrica para os dados dos tempos de falha. A função estimada evidencia a forma como o feixe tubular diminui sua chance de permanência em operação, à medida que o tempo passa. Neste caso, a estimativa para o tempo médio até a falha foi de 139,1 meses e mediana de 181,6 meses. Esta abordagem foi considerada mais adequada aos dados amostrais de pesquisa.

Cabe ressaltar que os resultados encontrados neste estudo não podem ser generalizados e nem extrapolados para outras unidades ou outros tipos de equipamentos, visto que, as características de corrosão, as configurações de escoamento e as condições operacionais são específicas para cada tipo de unidade operacional. Dentre as limitações do estudo, pode-se citar a o curto período de amostragem e acompanhamento dos trocadores de calor de casco e tubos, o qual compreendeu apenas três paradas de manutenção (programadas para ocorrer a cada 6 anos). Vale ressaltar também que nenhuma das análises estatísticas realizadas considerou a inclusão de covariáveis na modelagem das funções de confiabilidade ou função taxa de falhas.

REFERÊNCIAS

[1] ALLAN, R. N.; BILLINTON, R. **Reliability Evaluation of Engineering Systems**: concepts and techniques. 2. ed. New York: Plenum Press, 1992. 453 p.

[2] ASCHER, H.; FEINGOLD, H. **Repairable systems reliability**: modeling, inference, misconceptions, and their causes. CRC Press, Marcel Dekker, Inc. (October 9, 1984), New York, 240p, 1984. ISBN 978-08-2477-27-65.

[3] BARDIN, L. Análise de Conteúdo. 1ª ed. São Paulo: Editora Martins Fontes, 1977, 226 p.

[4] BERGAMO FILHO, V. **Confiabilidade básica e prática**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1997, 108 p. ISBN 978-85-2120-10-14.

[5] BRANCO FILHO, G. **Indicadores e Índices de Manutenção**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2006. 148 p.

[6] CARVALHO, M. S. et al. **Análise de Sobrevivência**: teoria e aplicações em saúde. São Paulo: Fiocruz, 2011.

[7] FAERSTEIN, E. Técnicas de análise de sobrevida. **Cad. Saúde Pública**, v. 8, n. 3, jun. 2002. DOI: https://doi.org/10.1590/S0102-311X2002000300003. Acesso 09 junho 2022.

[8] FREITAS, M. A. COLOSIMO, E. A. **Confiabilidade**: análise de tempo de falha e testes de vida acelerados. Belo Horizonte: FCO, 1997.

[9] GIOLO, S. R.; COLOSIMO, E. A. **Análise de Sobrevivência Aplicada**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

[10] HENRIQUES, P.C. F, CARNEVAL, R. O. **Ensaio Não-destrutivo por Correntes Parasitas**. 1. ed. Rio de Janeiro: DITED/Petrobras, 1990.

[11] LAFRAIA, J. R. B. **Manual de Confiabilidade Mantenabilidade e Disponibilidade**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001, 388 p. ISBN: 978-85-7303-79-20.

[12] LIERTZ, H.; OESTREICH, U.H.P. Application of Weibull distribution to mechanical reliability of optical waveguides for cables. **Siemens Forschungs- und Entwicklungsber**. n. 5, p. 129–135, 1976.

[13] MADUREIRA, C.;SERVIUC, N.; BIRCHALL, M. **Ensaio IRIS**: uma ferramenta para avaliação da integridade estrutural e avaliação da vida útil de trocadores de calor e caldeiras. São Paulo, 2004.

[14] MÁQUINA, C. M. **Análise de Dados de Sobrevivência Espacialmente Correlacionados**. 2014. Dissertação (Mestrado em Estatística) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

[15] MINITAB, LLC (2021). Versão 18. Minitab® Statistical Software.

[16] OLIVEIRA, R. V.; CARNEVAL, R. O. **Inspeção de tubos ferromagnéticos de permutadores de calor**, In: 15ª mesa redonda de materiais, inspeção de equipamentos e controle da corrosão. PETROBRAS/CENPES. Rio de Janeiro: 2012.

[17] PARKASH, S. **Refining Processes Handbook**. Gulf Professional Publishing, Elsevier, Burlington, MA, USA, 2003. ISBN 978-0-7506-7721-9.

[18] RINNE, Horst. **The Weibull Distribution**: A Handbook. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2008. 784p.

[19] ROSS, Sheldon. **Probabilidade**: Um Curso Moderno com Aplicações. Porto Alegre: Bookman. 2010.

[20] SABINO, R. S. **Inspeção de feixes tubulares de trocador de calor**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

[21] SADIK, Kakaç; LIU, Hongtan. **Heat Exchangers**: Selection, Rating and Thermal Design 2nd Edition ed. [S.l.]: CRC Press. 2002. ISBN 0849309026

[22] SIKOS, László; KLEMES, Jir. Reliability, availability, and maintenance optimisation of heat exchanger networks. **Applied Thermal Engineering**, 30, 2010, p. 63–69. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.02.013

[23] SILVA, A. A. **Análise de Sobrevivência com Erros de Classificação**. 2012. Dissertação (Mestrado em Estatística) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

[24] TRINDADE, A. L. G**. Política ótima de manutenção em sistemas reparáveis sujeitos a manutenções imperfeitas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

[25] TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION. **TEMA Standard**. New York: TEMA, 7. ed, 1998.

[26] WEIBULL, W. A statistical distribution function of wide applicability. **Journal of Applied Mechanics,** n. 18, p. 293–296, 1951. DOI: https://doi.org/10.1115/1.4010337.

[27] WU, Wei; CHENG, Guangxu; HU, Haijun; ZHOU, Qi. Risk analysis of corrosion failures of equipment in refining and petrochemical plants based on fuzzy set theory. **Engineering Failure Analysis**, 32, 2013, p. 23–34. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.03.003

[28] YASMAL, Aslı. et al. Data Driven Leak Detection in a Real Heat Exchanger in an Oil Refinery. **Computer Aided Chemical Engineering**, 52, 2023, p. 3091-3096. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15274-0.50493-5

[29] ZHI, Chengqiang; YANG, Xiuqin; ZHOU, Xiang; TU, Shuyang; ZHANG, Tu. A revised sizing method for borehole heat exchangers in the Chinese national standard based on reliability and economy. **Renewable Energy**, 191, 2022, p. 17-29. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.043.

Capítulo 16

Organização de conteúdo em mídia social: busca e análise de vídeos sobre ferramentas da qualidade no setor de saúde e logística

Leandro Mendonça Lalli Peron
Vanderli Correia
Lívia Gregorio Takemura
Nathalie Cristiny Pereira Lopes

Resumo: Este trabalho consistiu em pesquisar, analisar e agrupar materiais de vídeo disponíveis em plataforma pública (YouTube) com conteúdo sobre a gestão da qualidade (GQ) e sobre a aplicação das ferramentas da qualidade (FQ) nos setores da saúde e logística, com o objetivo de entender o padrão de divulgação e consumo de conhecimento acerca do tema. O interesse pelo assunto surgiu devido à crise humanitária e econômica que se deu em decorrência da pandemia do Coronavírus e pela importância dessas áreas nesse contexto. Este estudo categoriza os 80 vídeos que fizeram parte da amostra em (1) GQ (2) FQ (3) GQ/FQ (4) GQ/FQ_S e (5) GQ/FQ_L, sendo 4 e 5, respectivamente setor de saúde e setor de logística. Os resultados demonstraram que há uma constância em termos da quantidade de vídeos que são publicados na área da Saúde e que houve um aumento de 200% na quantidade de vídeos publicados na área da Logística em 2021 em relação ao ano anterior. Os vídeos foram organizados em *playlists* para disponibilização pública. O estudo permitiu avaliar o padrão de vídeos publicados e as métricas de engajamento, e pode servir de base para a identificação de lacunas e melhoria na disseminação dos conhecimentos sobre os temas propostos. Ademais fica exposto as oportunidades para mais estudos sobre o conteudo divilgado acerca de ferramentas da qualidade e gestão da qualidade em geral via mídias sociais.

Palavras-chave: Qualidade, gestão da qualidade, ferramentas da qualidade, qualidade na saúde, qualidade na logística, YouTube, divulgação científica.

1. INTRODUÇÃO

A evolução do campo de estudos sobre qualidade conta com alguns marcos relatados em Ahmed, Hassan e Taha (2002), Carvalho e Paladini (2012) e Juran (1997). No início do século XX as fábricas nas nações inicialmente industrializadas, como nos Estados Unidos, já contavam com uma estrutura formal, mas a gestão da qualidade era informal. Na busca pela produtividade baseada nos princípios de Taylor, a qualidade limitava-se à aprovação do produto final. Na fase seguinte a ênfase da qualidade passou para a busca da conformidade dos parâmetros dos processos produtivos. Em uma terceira etapa a qualidade estendeu-se para o ciclo produtivo, que envolvia o atendimento às especificações, do design do produto até a sua disposição final. Mais tarde evoluiu-se para a Gestão da Qualidade Total (GQT), envolvendo o atendimento às necessidades de todos os stakeholders.

Amplamente difundida na área Industrial, a qualidade é entendida como a adequação do produto ao uso. Como fator estratégico, a gestão da qualidade (GQ) está relacionada à melhoria da produtividade e, consequentemente da competitividade, desde que esteja presente em todas as etapas relacionadas com o processo produtivo, direta ou indiretamente.

O sucesso da aplicação da GQT na área industrial impulsionou seu uso no setor de serviços., conforme Jasti et al. (2022), no qual esse trabalho se insere.

Essa pesquisa foi realizada nas áreas de saúde e logística, motivada pelo impacto que essas áreas tiveram para superar a crise da pandemia do Coronavírus, como pode ser verificado no trabalho de Bastos e Gadelha (2023).

A crise acelerou a transformação digital de empresas de produtos e prestação de serviços e vem mudando os hábitos de consumo da população por meio de compra de refeições, produtos e serviços por meio eletrônico e de aplicativos. Segundo levantamento realizado pela Associação Brasileira de Comércio Eletrônico em 2020 as vendas online aumentaram 68% em comparação a 2019, números expressivos com impacto direto no setor de logística (ABComm, 2021).

Dada a importância dos setores de saúde e logística e a complexidade das mudanças que vêm ocorrendo, pesquisas da área da qualidade podem contribuir para aperfeiçoamento dos processos de trabalho. Há um reconhecimento tanto da literatura quanto da realidade organizacional sobre a importância não apenas dos modelos e frameworks de GQT quanto das ferramentas da qualidade (FQ) (JASTI et al., 2022).

O foco deste estudo foram as ferramentas básicas da qualidade, que são consideradas poderosas e adequadas para analisar aspectos da GQ (AHMED;HASSAN; TAHA, 2002).

Este trabalho fez o levantamento de vídeos disponíveis no YouTube com conteúdo sobre GQ e FQ nos setores em geral e também, especificamente nos setores de saúde (GQ/FQ_S) e logística (GQ/FQ_L), permitindo identificar o padrão das publicações e o alcance dos mesmos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Gestão da Qualidade Total (GQT) está fundamentada em princípios, tais como os propostos pela norma ISO 9000 (ABNT, 2015), quais são: foco no cliente, liderança, engajamento das pessoas, abordagem de processo, melhoria, tomada de decisão baseada em evidência e gestão de relacionamento. Em consonância com esses princípios Tarí e

Sabater (2004) afirmam que a GQT foi desenvolvida em torno de uma série de fatores que podem variar de um autor para outro, mas que essencialmente são, entre outros, liderança, planejamento da qualidade, gestão dos recursos humanos, formação, equipas de trabalho e participação dos trabalhadores, os quais são considerados a *"soft part"* da GQT; enquanto que gestão de processos, cooperação com clientes e fornecedores, melhoria contínua, e ferramentas e técnicas representam a *"hard part"* desse sistema (HELLSTEN; KLEFSJO, 2000).

Ahmed, Hassan e Taha (2002) consideram que a GQT não pode ser eficaz sem o uso de um conjunto de ferramentas e técnicas. Nesse sentido, a literatura faz distinção entre os dois termos (AHMED, HASSAN E TAHA, 2002; BAMFORD; GREATBANKS, 2005).

A ferramenta da qualidade destina-se a uma aplicação específica, tem um foco restrito de aplicação e é focada em si mesma. Já a técnica tem aplicação em um contexto mais amplo, requer pensamentos mais complexos de solução de problemas e habilidades e treinamento para sua aplicação a fim de alcançar efetividade. Algumas técnicas são o Q*uality Function Deployment* (QFD) e a análise de modos e efeitos de falhas (FMEA, em inglês).

Alguns exemplos de ferramentas básicas da qualidade são: Diagrama de causa e efeito, Diagrama de Pareto, Diagrama de dispersão, Fluxograma, Gráfico de controle e Brainstorming. No trabalho de Bamford e Greatbanks (2005) é possível encontrar exemplos de FQ organizadas de forma a resolver problemas do dia a dia.

Quando as ferramentas da qualidade são aplicadas corretamente elas são capazes de produzir a repetibilidade e confiabilidade dos resultados (Dale e Shaw, 1999) e fornecem informações úteis para a melhoria do sistema da qualidade muito mais facilmente. Existem ferramentas avançadas da qualidade mais associadas a um tipo de indústria, mas se ajustados os modelos, podem ser aplicadas em diversos setores, até na remanufatura (PERON; RODRIGUES, 2021).

2.1. QUALIDADE NO SETOR DE SAÚDE E LOGÍSTICA

Segundo a maior organização mundial de cadeia de suprimentos, *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP, 2010), a logística faz parte da cadeia de abastecimento, sendo responsável por planejar, implementar e controlar o fluxo e operações de armazenagem e transporte de bens, serviços e informação de forma eficiente e eficaz entre a origem e o consumidor final, que deve ter seus requisitos e necessidades atendidas. Ainda segundo o grupo CSCMP (2010) a logística também é responsável pela gestão de entradas e saídas nos processos de transporte, cabendo à área gerenciar as frotas, estoque, demanda, tempo e demais recursos envolvidos.

Para que o objetivo de toda cadeia seja a adequação às necessidades e expectativas dos clientes, a gestão da qualidade deve ser praticada, segundo Ballou (2006) em três importantes áreas de tomadas de decisão: estratégia da estocagem, estratégia de transporte e estratégia de localização.

O setor da saúde é composto por vários sistemas que interagem entre si, envolvendo hospitais e centros de saúde, redes profissionalizantes, centros de pesquisa e desenvolvimento, indústrias farmacêuticas, produtores de equipamentos médicos, indústrias de biotecnologia e instituições regulamentadoras (CARVALHO, 2003).

Um dos mais importantes sistemas do setor da saúde no Brasil é o Sistema Único de Saúde (SUS), que é composto pelo Ministério da Saúde, Estados e Municípios, conforme determina a Constituição Federal (Ministério da Saúde, 2021). Para o funcionamento do sistema em todo o território nacional, é necessário estabelecer planos, diretrizes, metas e objetivos.

Dentre os objetivos do Plano Nacional de Saúde (PNS 2020-2023) "aperfeiçoar a gestão do SUS visando a garantia do acesso a bens e serviços de saúde equitativos e de qualidade" (Ministério da Saúde, 2020, p.136), o que remete à busca da melhoria de processos e sistemas.

A utilização de métodos e ferramentas da qualidade podem fornecer melhoria nos processos e procedimentos de atendimento ao paciente, além de agregar indicadores para tomada de decisão nos setores administrativos de hospitais, postos de saúde, laboratórios, indústrias produtoras de equipamentos, fármacos e outros insumos para a saúde.

3. METODOLOGIA

Este trabalho empregou a abordagem qualitativa, que foi conduzida por meio da pesquisa documental no qual se incluem os vídeos (GODOY, 1995).

As etapas da metodologia estão demonstradas no Quadro 1.Tendo como base o referencial teórico e os objetivos da pesquisa, inicialmente foi feita uma pesquisa exploratória de materiais em vídeo disponíveis no YouTube. Foram, então, definidos os critérios para coleta e registro das informações dos vídeos, também descritos no Quadro 1.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. DEFINIÇÃO DA AMOSTRA

Foram coletados 100 vídeos. Destes, 20 foram excluídos, de acordo com os critérios estabelecidos no Quadro 1. A Tabela 1 apresenta o detalhamento dos vídeos excluídos. Dos 80 vídeos que compõem a amostra final, 90% compreendem o período entre 2017 e 2021.

Quadro 1 Metodologia da pesquisa

Etapa da Metodologia	Critérios para classificação e análise dos vídeos
Coleta de vídeos no YouTube	Tabela 1: Informações básicas: Título do vídeo; Plataforma; Duração; Data de Publicação; Link para acesso
	Métricas de alcance e engajamento: Número de visualizações; número de curtidas; número de comentários.
	Estilo de vídeo: Tipo de vídeo; modelo de apresentação
	Conteúdo: Tema abordado; Ferramentas citadas; Resumo
Tabulação dos vídeos coletados	**Tipo de vídeo**: Tipo 1: Vídeo expositivo e conceitual; Tipo 2: Vídeo com exemplos de aplicações práticas; Tipo 3: Vídeo expositivo e conceitual com exemplos de aplicações práticas; Tipo 4: Estudos de caso
	Modelo de apresentação: Modelo 1: Ilustrações animadas sem apresentador visível; Modelo 2: Ilustrações animadas com apresentador visível; Modelo 3: Apresentação de slides sem apresentador visível; Modelo 4: Apresentação de slides com apresentador visível; Modelo 5: Apresentação de slides e gravação de tela (aplicativo Excel) sem apresentador visível; Modelo 6: Gravação de transmissão ao vivo com apresentação de slides e apresentador visível; Modelo 7: Apresentador visível sem demais recursos; Modelo 8: Montagem de imagens e/ou vídeos com apresentador visível; Modelo 9: Gravação de transmissão ao vivo com apresentador visível sem demais recursos; Modelo 10: Gravação de tela (aplicativo Excel) sem apresentador visível; Modelo 11: Entrevista; Modelo 12: Montagem de imagens e/ou vídeos sem apresentador visível; Modelo 13: Gravação de palestra.
	Tema abordado: Tema 1: Gestão da qualidade; Tema 2: Ferramentas da qualidade; Tema 3: Gestão da qualidade e ferramentas da qualidade; Tema 4: Gestão da qualidade e ferramentas da qualidade no setor da saúde; Tema 5: Gestão da qualidade e ferramentas da qualidade no setor da logística.
	Tempo de duração do vídeo: Curta: menor que 15 minutos; **Média:** maior que 15 minutos e menor que 1 hora; **Longa**: maior que 1 hora.
Seleção da amostra final	**Critérios de inclusão:** I1- Plataforma: YouTube; I2-Idioma:Português; I3-Ano de publicação: 2010 a 2021.
	Critérios de exclusão: E1: Vídeos promocionais; E2: Duração menor do que 3 minutos; E3: proibição de uso por direitos autorais.
Análise dos dados	Estatística descritiva (tabelas e gráficos).

Tabela 1 – Seleção dos vídeos da amostra

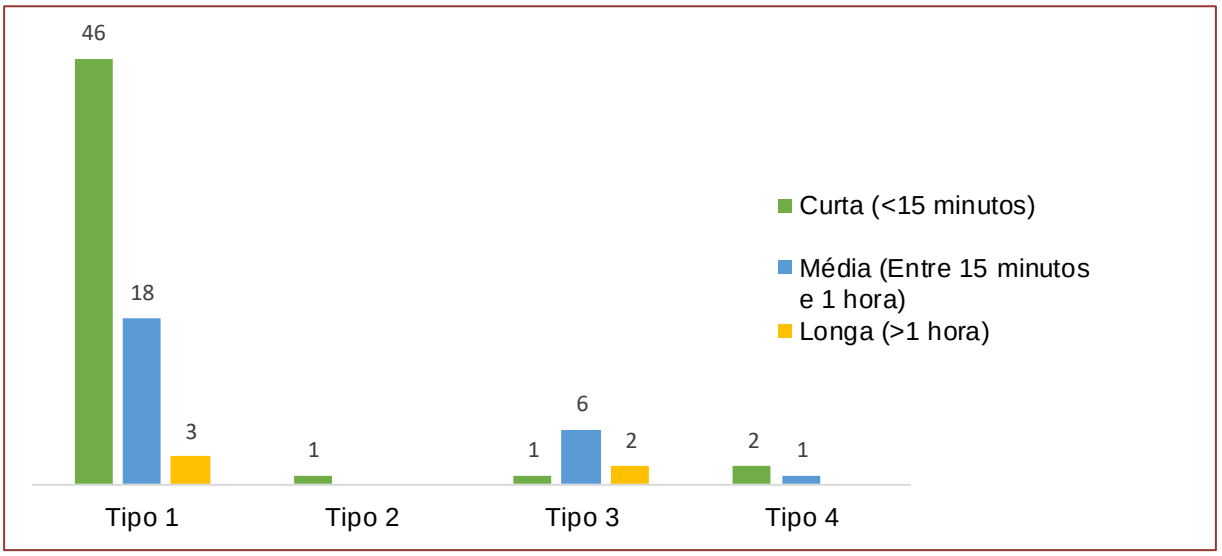
Tratamento dos dados				
Identificação	Vídeos coletados disponíveis no YouTube			100
Seleção	Critérios de Inclusão	I1	Plataforma: Youtube	100
		I2	Idioma: Português	100
		I3	Ano de Publicação: 2010 a 2021	100
	Critérios de Exclusão	E1	Vídeos Promocionais	16
		E2	Duração menor do que 3 minutos	10
		E3	Proibição de uso por direitos autorais	1
Inclusão	Total Incluído			80

4.2. CARACTERÍSTICAS DOS VÍDEOS

A partir dos dados coletados e tratados e através de gráficos e tabelas foi possível visualizar e entender as relações entre eles. As tabelas foram organizadas em excel, e não estão sendo apresentadas neste trabalho devido à limitação de espaço.

No gráfico 1 é apresentada a relação da duração do vídeo com o tipo de vídeo.

Gráfico 1 – Duração por tipo de vídeo

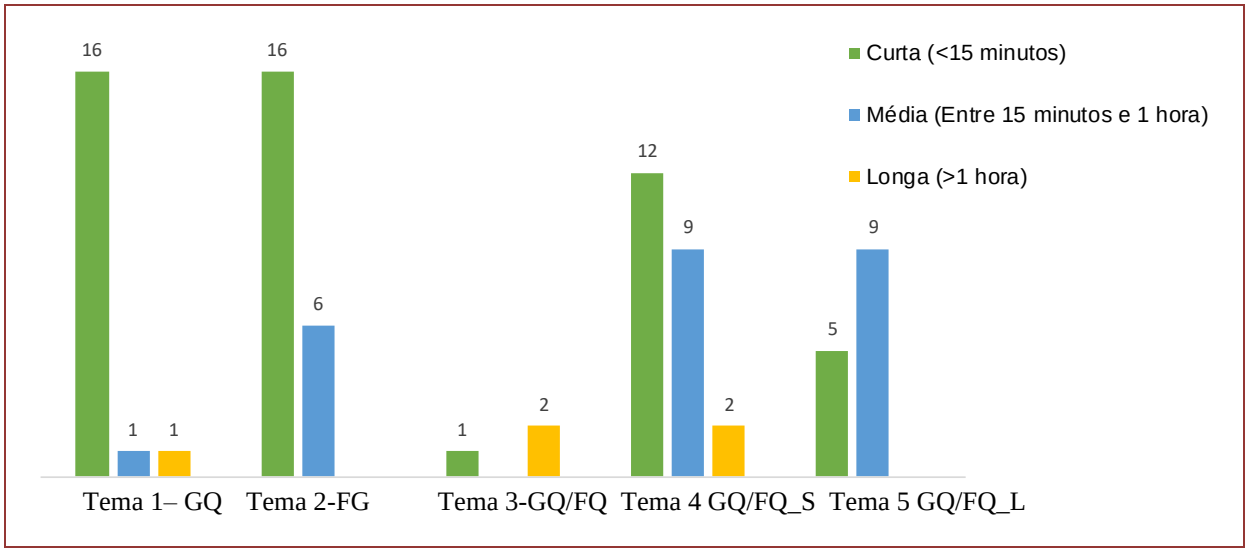


Quanto ao tipo de vídeo (Quadro 1), verifica-se que 67 vídeos (84%) são do Tipo 1, 9 vídeos (11%) são do Tipo 3, e os tipos 2 e 4 somam 5% do total dos vídeos.

Quanto à duração, 50 vídeos ao todo (62,5%) são de curta duração, seguidos por 31,2% de média duração e 5% de curta duração. Dos vídeos do Tipo 1, que expõem conceitos, 46 (68,6%) são de curta duração. Por outro lado, os vídeos do Tipo 3, que expõem aplicações práticas, 66% deles (6 vídeos) são de média duração.

No Gráfico 2 é apresentada a relação da duração do vídeo com o tema abordado.

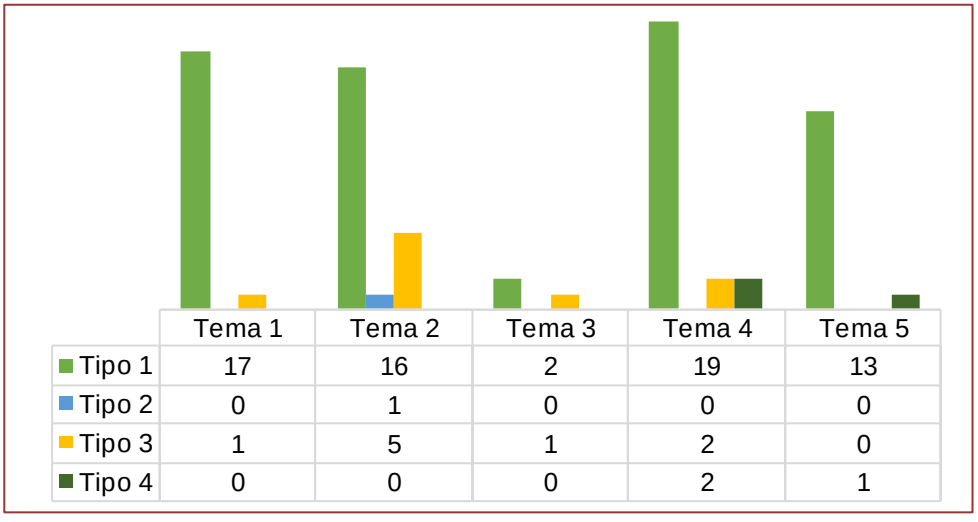
Gráfico 2 – Duração do vídeo por tema abordado



Os Temas 1 e 2 representam, respectivamente, 22,5 e 27,5% dos vídeos, com a predominância de vídeos de curta duração. Os vídeos na área da Saúde (Tema 4) representam 28,7% da amostra (23 vídeos) e os de Logística representam 17,5% da amostra (14 vídeos). A proporção de vídeos de curta duração é maior no Tema 1 (88,8%), seguido do Tema 2 (72,7%) e do Tema 4 (52,1%). Nos vídeos da área de Logística predominam os de média duração (64,2%).

O Gráfico 3 mostra a frequência de cada tipo de vídeo de acordo com o tema abordado, sendo que o Tipo 1 (vídeo expositivo e conceitual) representa 83,7% dos vídeos e é o único tipo presente em todos os temas. Os demais, 16,3% dos vídeos, apresentam aplicações práticas (Tipos 2 e 3) ou estudos de caso (Tipo 4).

Gráfico 3 – Tipos de vídeo por tema abordado

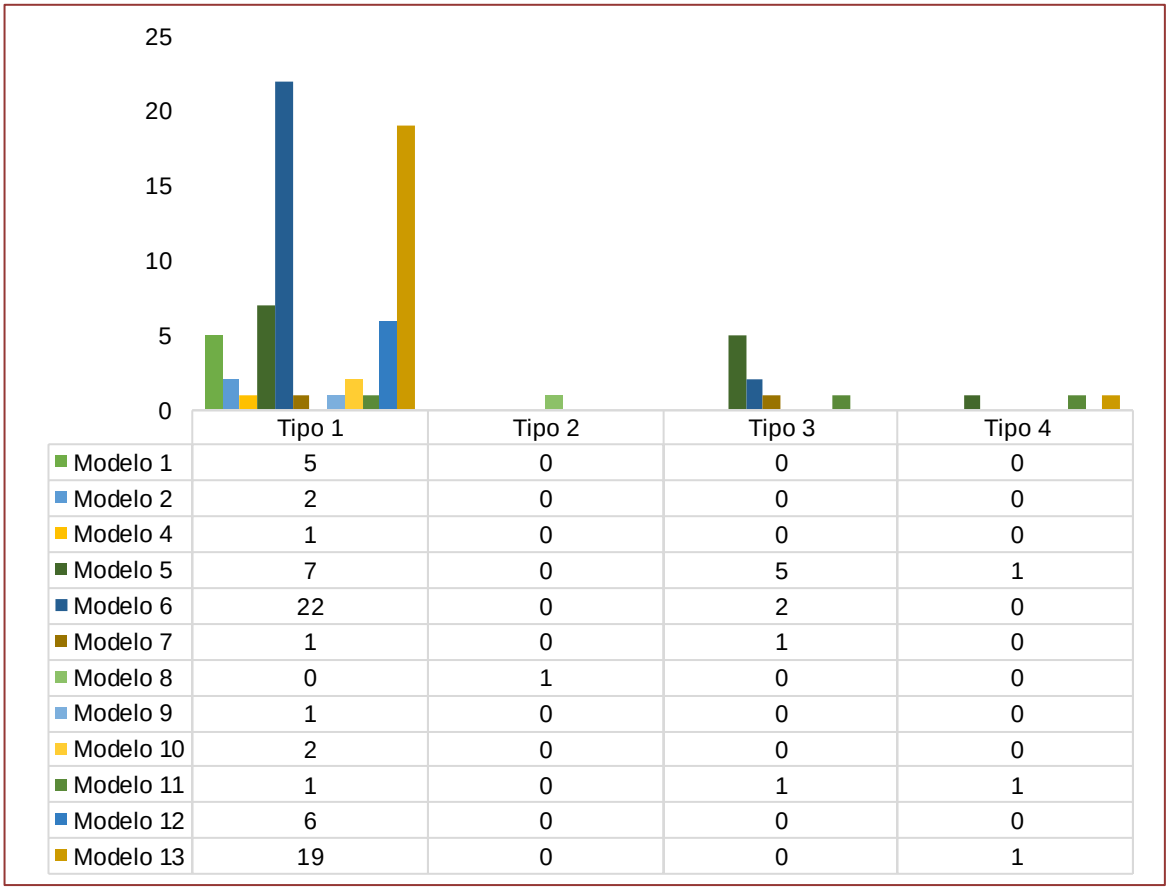


	Tema 1	Tema 2	Tema 3	Tema 4	Tema 5
Tipo 1	17	16	2	19	13
Tipo 2	0	1	0	0	0
Tipo 3	1	5	1	2	0
Tipo 4	0	0	0	2	1

No Gráfico 4 é possível verificar o modelo de apresentação que tem sido utilizado por tipo de vídeo. Do total de vídeos Tipo 1, a maior parte, 22 (32,8%) utilizam o Modelo 6 de

apresentação: gravação de transmissão ao vivo com apresentação de slides, seguidos de 19 (28,3%) que utilizam o Modelo 13 (gravação de palestra).

Gráfico 4 – Modelo de apresentação por tipo de vídeo



	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
Modelo 1	5	0	0	0
Modelo 2	2	0	0	0
Modelo 4	1	0	0	0
Modelo 5	7	0	5	1
Modelo 6	22	0	2	0
Modelo 7	1	0	1	0
Modelo 8	0	1	0	0
Modelo 9	1	0	0	0
Modelo 10	2	0	0	0
Modelo 11	1	0	1	1
Modelo 12	6	0	0	0
Modelo 13	19	0	0	1

Importante observar que foram coletados 3 vídeos Modelo 3 que foram excluídos da amostra pelo critério E1 (vide seção 3.1) e por isso não foram considerados no Gráfico 4 e no tratamento de dados em geral.

4.3. MÉTRICAS DE ALCANCE E ENGAJAMENTO

Esta seção utiliza métricas específicas para avaliar o alcance dos vídeos junto ao público que utiliza a plataforma YouTube, de acordo com as características dos vídeos já identificadas na seção anterior.

O número de visualizações no instante da coleta foi utilizado como parâmetro principal nas próximas demonstrações de resultados. A média de visualizações por vídeo foi 4488 e foi calculada com a retirada de dados discrepantes (outliers), por meio do método baseado na amplitude interquartis, aplicando-se a fórmula:

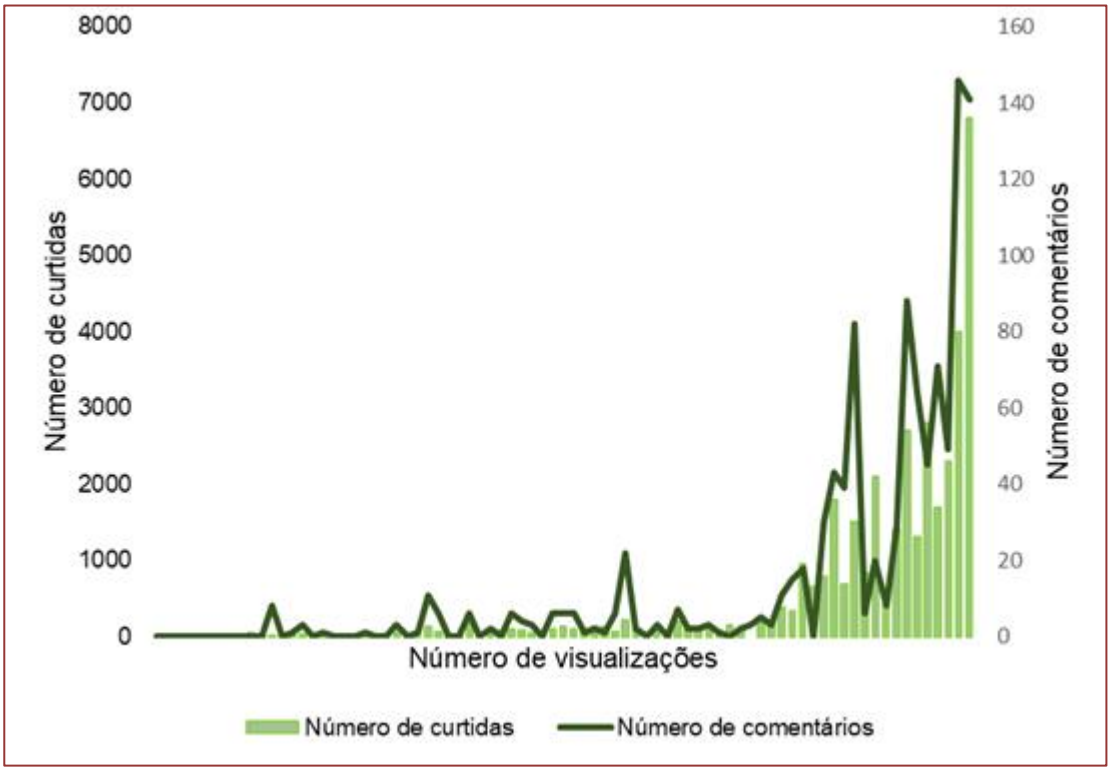
$$Linf = Q1 - (1.5 * IQR) \ (1)$$

$$Lsup = Q3 + (1.5 * IQR) \ (2),$$

Em que: Q1 é o primeiro quartil; Q3 o terceiro quartil; *Lsup* limite superior; e *Linf* limite inferior.

O Gráfico 5 identifica a relação do número de curtidas e comentários com o número de visualizações por vídeo. Observa-se que a relação entre o número de visualizações, curtidas e comentários é direta, ou seja, quanto maior o número de visualizações do vídeo, maior o número de curtidas e comentários.

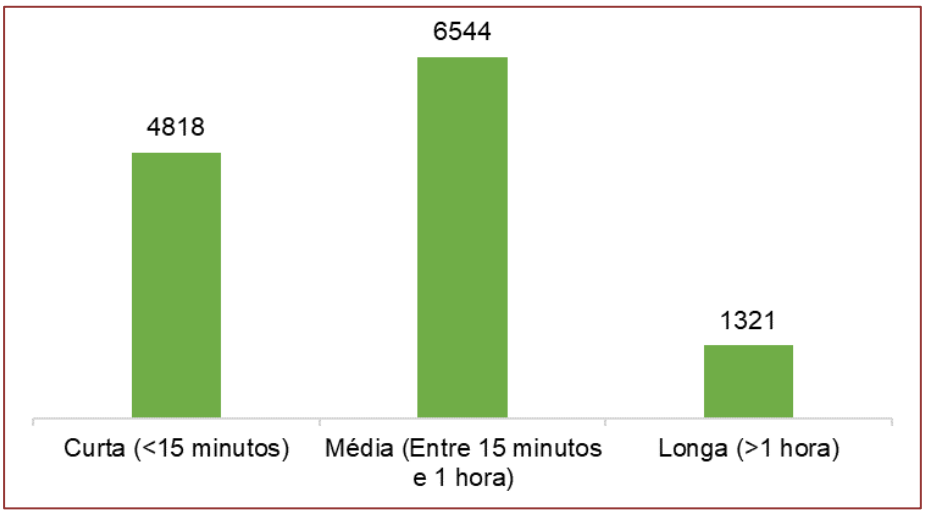
Gráfico 5 – Métricas de alcance e engajamento



Os Gráficos seguintes mostram a variação da média de visualizações por vídeo de acordo com a duração do vídeo (gráfico 6), tipo de vídeo (gráfico 7), tema abordado (gráfico 8) e modelo de apresentação (gráfico 9).

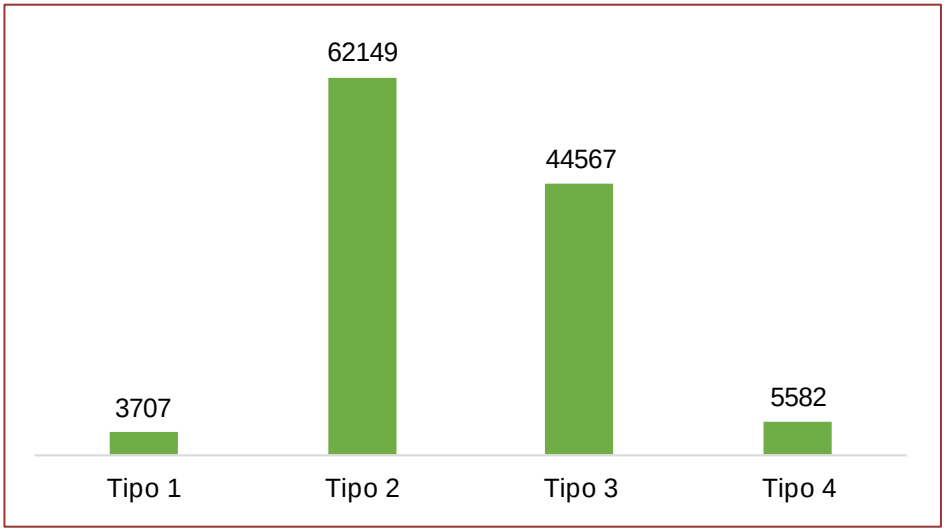
Quanto à duração (Gráfico 6), os vídeos com maior visualização são os de média duração (de 15 minutos a 1 hora) com 51,5% do total, seguido pelos de curta duração (38% do total) e dos de longa duração (10,5%) do total.

Gráfico 6 – Média de visualizações por vídeo por duração de vídeo



Quanto aos tipos de vídeos, o Gráfico 7 mostra que o tipo 2 (vídeo com exemplos de aplicações práticas) teve a maior média de visualizações (53,6%), seguido do tipo 3 (vídeo expositivo e conceitual com exemplos de aplicações práticas) – 38,4%,e do tipo 4 (estudo de caso) – 4,8% e do tipo 1 (vídeo expositivo e conceitual) – 3,2%. Excluindo-se da amostra o vídeo tipo 2, que é o único desse tipo na amostra, o vídeo tipo 3 passa a ter 82,8% das médias de visualizações.

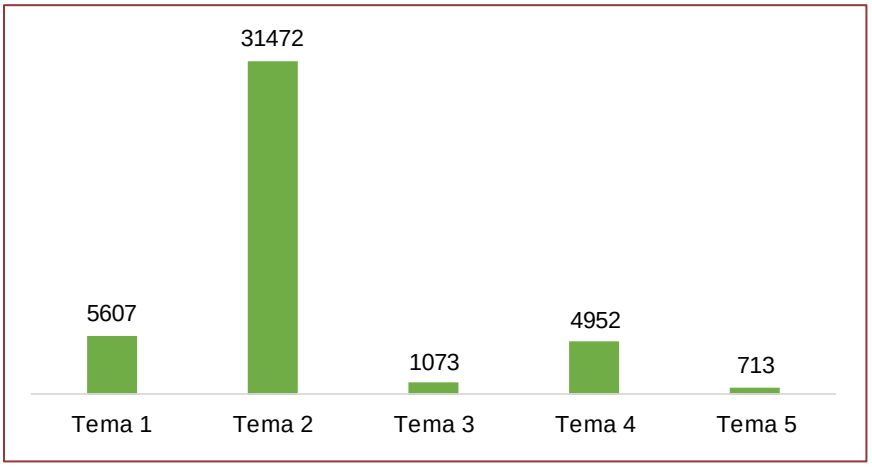
Gráfico 7 – Média de visualizações por vídeo por tipo de vídeo



O Gráfico 8 demonstra que o tema 2 (ferramentas da qualidade) foi o tema abordado com maior média de visualizações (31472 – 82,4%), seguido pelo Tema 1 (14,7%) e o tema 4 (13%).

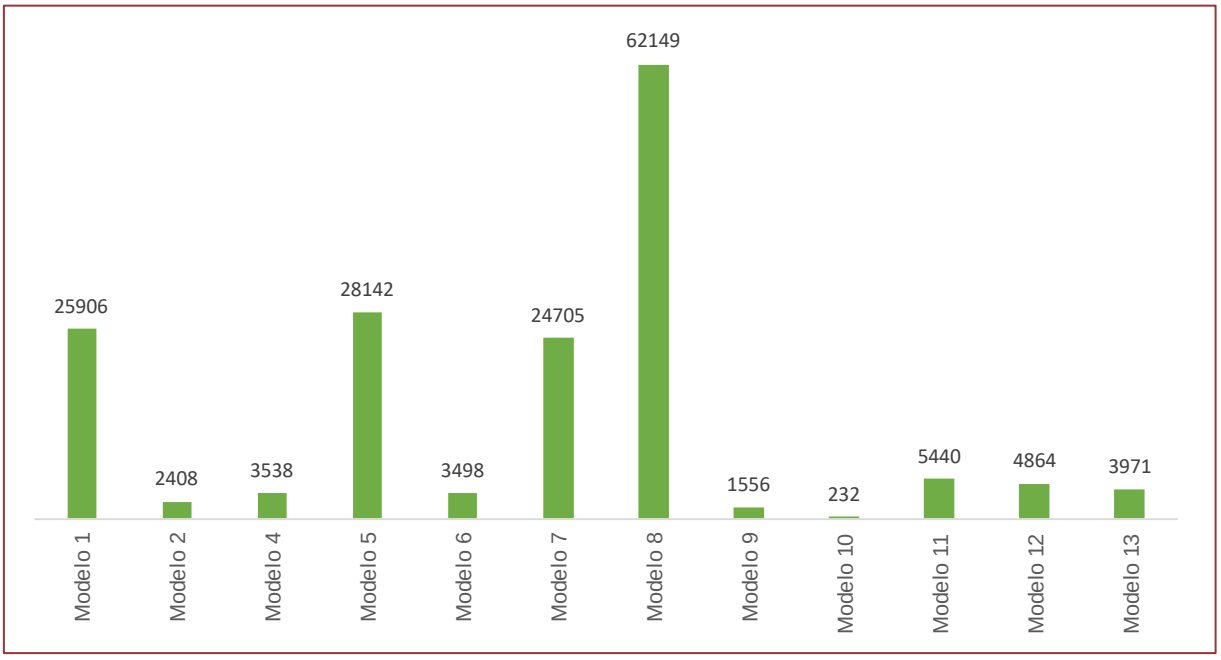
Na pesquisa foi possível observar que o tema 3 (gestão da qualidade e ferramentas da qualidade) foi o tema menos abordado, porém a distribuição de vídeos pelos demais temas mostrou-se equilibrada (gráfico 8).

Gráfico 8 – Média de visualizações por vídeo por tema abordado



Quanto aos modelos de apresentação no Gráfico 9, o modelo 8 - gravação de tela em aplicativo do Excel sem apresentador visível foi o com maior média de visualizações. No entanto, trata-se do mesmo vídeo mencionado na análise do Gráfico 7. Excluindo-se esse vídeo da análise, os modelos 5 (apresentação de slides sem apresentador visível), o modelo 1 (ilustrações animadas sem apresentador visível) e o modelo 7 (apresentação de slides e gravação de tela no aplicativo Excel e sem apresentador visível) são os que possuem maior média de visualizações.

Gráfico 9 – Média de visualizações por vídeo por modelo de apresentação



5. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi entender o padrão de divulgação e consumo de conhecimento acerca das ferramentas da qualidade, no ambiente do YouTube, com ênfase nos setores da saúde e logística, assim como analisar o efeito da pandemia do Coronavírus na publicação de vídeos nessas áreas.

Por meio da revisão de literatura evidenciou-se a importância das FQ no processo de melhoria contínua, sendo que alguns autores até mesmo consideram que o campo de estudo da qualidade abarca dois grandes temas, o da GQT e o das FQ.

A pesquisa mostrou que 2019 foi o ano com mais publicações de vídeos e em 2021 houve a maior quantidade de vídeos publicados com o tema 5 (GQT/FG_L). O tema 4 (estudos de caso) foi o único com publicações em todos os anos.

No âmbito da GQT e aplicação de FQ no setor da saúde, mesmo com o momento de pandemia, o levantamento e análise dos dados mostrou que não houve uma tendência de crescimento no número de vídeos publicados na plataforma do YouTube ao longo do tempo, mas observou-se que a GQT e as FQ são um frequente objeto de estudo, já que foram encontrados vídeos sobre o tema em todos os anos de publicação presentes na pesquisa.

Quanto ao setor de logística, foi possível observar um aumento de 200% na quantidade de vídeos publicados na plataforma no ano de 2021 em relação ao ano anterior, o que pode indicar um aumento pela busca de conhecimento sobre a o tema no setor, uma vez que este também apresenta uma recente rampa de crescimento impulsionada pela mudança de comportamento do consumidor a partir da pandemia do Coronavírus.

Quanto ao padrão de divulgação dos vídeos, identificou-se a predominância dos vídeos tipo 1 – expositivo e conceitual – (84%) e de curta duração (61,2%), como indicam os Gráficos 1 e 2. Os vídeos de média duração, apesar de não serem o padrão predominante em termos de divulgação (31,2% da amostra) são o padrão predominante em termos de consumo com 51,6% do total da média de visualizações (Gráfico 6).

Em relação aos modelos de apresentação, 73,7% dos vídeos são com apresentador visível, somando-se os modelos 1, 2, 4, 6. 7, 8, 9, 11, 13 no Gráfico 4, e identificados no Quadro 1.

A frequência de utilização dos modelos de apresentação também variou de acordo com o tema abordado, sendo o modelo 6 o único utilizado em todos os temas e o modelo 13 o mais utilizado em vídeos com o tema 1, como indica a análise do Gráfico 4.

Como contribuição para divulgação científica, foram criadas três *playlists*, descritas a seguir. Para esta publicação foi feita uma seleção qualitativa dos vídeos, considerando principalmente a qualidade de imagem, som e, eventualmente, clareza quanto à comunicação do conteúdo.

Playlist 1: Gestão e Ferramentas da Qualidade:

https://youtube.com/playlist?list=PLaNO9ZfHAeJNxuEhpo8SEA8VUIxLOQsLy

Playlist 2: Gestão e Ferramentas da Qualidade no Setor da Saúde:

https://youtube.com/playlist?list=PLaNO9ZfHAeJMLtXQC3u4BpddAQO3ShguE

Playlist 3: Gestão e Ferramentas da Qualidade no Setor Logístico

https://youtube.com/playlist?list=PLaNO9ZfHAeJMwNL6lt6Znxpbal3vrMvwo

As *playlists* criadas podem atender um perfil variado de pessoas como os estudantes, gestores, professores, pesquisadores, entre outros, já que possuem conteúdos técnicos, teóricos, práticos e casos de aplicação no setor empresarial.

A pesquisa, base de dados e análises desenvolvidas neste projeto permitem a identificação de possíveis lacunas de conteúdo nos vídeos disponíveis e da necessidade de criação de novos materiais.

Durante a realização deste trabalho a maior dificuldade encontrada foi devido à alta especificidade dos critérios definidos, com destaque às categorias de modelo de apresentação, tipo de vídeo e tema abordado.

Sugere-se que pesquisas futuras analisem o perfil dos produtores de conteúdo e o público alvo a fim de identificar quem são os principais consumidores deste conteúdo, assim como o papel da Universidade na divulgação científica.

Sugere-se, também, ampliar a amostra sobre os vídeos do Tipo 2 (vídeo com exemplos de aplicações práticas) e Modelo 8 - gravação de tela em aplicativo do Excel, com alto índice de visualização, mas que se mostrou um *outlier* quando da análise dos resultados.

REFERÊNCIAS

[1] ABNT NBR ISO 9000: 2015 Fundamentos do Sistema de Gestão da Qualidade: Fundamentos e Vocabulário.

[2] AHMED, Shamsuddin; HASSAN, Masjuki Hj; TAHA, Zahari. State of implementation of TPM in SMIs: a survey study in Malaysia. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 10, n. 2, p. 93-106, 2004.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE COMÉRCIO ELETRÔNICO. Estado de Minas. Com pandemia, vendas pela internet crescem 27% e atingem R$ 161 bi em 2021. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2022/02/02/internas_economia,1342064/com-pandemia-vendas-pela-internet-crescem-27-e-atingem-r-161-bi-em-2021.shtml

[4] BALLOU, Ronald H. Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial. Tradução Raul Rubenich. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

[5] BAMFORD, David R.; GREATBANKS, Richard W. The use of quality management tools and techniques: a study of application in everyday situations. International Journal of Quality & Reliability Management, 2005.

[6] BASTOS, Denilson Sant Ana; GADELHA, Carlos Augusto Grabois. A contribuição da logística para o fortalecimento da produção nacional e para o acesso universal no âmbito do SUS. Saúde em Debate, v. 46, p. 171-186, 2023.

[7] CARVALHO, Adriana Karla Brasileiro de. Gestão da Qualidade nos Serviços de Saúde: Uma Proposta de Indicadores para Aumentar a Satisfação do Paciente/Cliente. 2003. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5812/1/arquivo7373_1.pdf. Acesso em: 05 jul. 2021.

[8] CARVALHO, Marly Monteiro de; PALADINI, Edson Pacheco. Gestão da qualidade: teoria e casos. Rio de Janeiro. Elsevier, 2012.

[9] JASTI, Naga Vamsi Krishna et al. A literature review on total quality management (models, frameworks, and tools and techniques) in higher education. The TQM Journal, v. 34, n. 5, p. 1298-1319, 2022.

[10] GODOY, Arilda Schmidt. Pesquisa qualitativa: tipos fundamentais. Revista de Administração de empresas, v. 35, p. 20-29, 1995.

[11] HELLSTEN, Ulrika; KLEFSJÖ, Bengt. TQM as a management system consisting of values, techniques and tools. The TQM magazine, v. 12, n. 4, p. 238-244, 2000.

[12] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2000), ABNT NBR ISO 9000:2000, “Sistemas de gestão da qualidade – Requisitos”, ABNT, Rio de Janeiro.

[13] JURAN, Joseph M. Qualidade no século XXI. HSM Management, n. 3, p. 96-104, 1997.

[14] MINISTÉRIO DA SAÚDE. Painel Coronavírus. Disponível em: https://covid.saude.gov.br. Acesso em: 03 jul. 2021.

[15] MINISTÉRIO DA SAÚDE. Plano Nacional de Saúde 2020-2023. Fevereiro de 2020. https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/plano_nacional_saude_2020_2023.pdf. Acesso em: 06 jul. 2021.

[16] PERON, Leandro M. L.; RODRIGUES, Leonardo R. Aplicação de FMEA na Remanufatura: Estudo de caso em uma indústria automotiva no Brasil. XXVIII SIMPEP Simpósio de Engenharia de Producao, UNESP, Bauru, SP, Nov 2021.

[17] TARÍ, Juan José; SABATER, Vicente. Quality tools and techniques: are they necessary for quality management?. International journal of production economics, v. 92, n. 3, p. 267-280, 2004.

Capítulo 17

Gestão informatizada de Kanban de requisição e Milk-Run: um estudo de caso aplicado em uma empresa do segmento metalmecânico

Evandro Segundo Soares Pereira

Resumo: Os benefícios do Kanban são incontestáveis, principalmente para a gestão de abastecimento de linhas de produção, porém hoje com a necessidade da informação *online*, algumas atribuições do Kanban precisam ser revisadas. Este estudo pretende demonstrar o processo de informatização da gestão de kanban de requisição em um ambiente gerenciado por este processo. A utilização de *hardwares* como coletores de dados, impressoras térmicas, gerenciados por um sistema WMS conectado a um ERP, serão as ferramentas para aplicação do processo. Benefícios como a visualização real dos saldos (Físico X Sistema), gestão da quantidade de movimentações de um Kanban. Otimização e roteirização do *milk-run* interno, são alguns dos benefícios alcançados neste estudo aplicado.

Palavras-chave: Kanban, Milk-Run, logística, coletores de dados, abastecimento linhas de produção.

1. INTRODUÇÃO

Considerado uma das ferramentas do Lean manufacturing, o Kanban tem como um dos objetivos simplificar o processo de gestão de movimentação de matérias. Nesta simplificação, a gestão de cartões implica na operação física destes, onde no caso do Kanban de abastecimento é a própria identificação da embalagem utilizada.

Por sua gestão visual, o kanban necessita da movimentação dos cartões e acompanhamento físicos, estando estes disponíveis nos quadros, nas linhas ou nos próprios produtos.

A informática como ferramenta de gestão de operações e armazenagem de dados, será utilizada para virtualizar a informação que ocorrem no ambiente físico, permitindo acompanhar via sistema informatizado a movimentação física realizada pelo cartão Kanban e consequentemente registrar este acompanhamento em dados. Permitindo a "alimentação de dados" dos processos integrada via equipamentos hardwares como leitores de códigos de barras e gerenciamento pelos módulos de estoque, WMS e coleta de dados do ERP.

O desenvolvimento da informática e o relacionamento com negócio *core* da empresa, neste caso interligando o processo físico de gestão do cartão Kanban com a informática, desenvolvendo um processo utilizando os módulos ERP TOTVS, customizações e coletores de dados. Possibilita a gestão acompanhar on-line a operação, agilidade das solicitações e utilizar os dados armazenados para a geração de informações gerenciais.

Desta maneira, o objetivo deste estudo será:

- Desenvolver um processo de cadastro de Pontos de entrega e relacionamento com a rota do Milk run, gerando uma rotina sistemática.
- Automatizar via coletor de dados o processo de requisição de abastecimento do Kanban, via leitura dos cartões Kanban.
- Desenvolver via sistema informatizado a gestão das solicitações de abastecimento de linhas e células produtivas. Integrando com o WMS a gestão da separação e a identificação dos volumes separados.
- Informatizar o processo de confirmação de abastecimento de linhas e células produtivas, para informar o milk run as necessidades de abastecimento e a confirmação do abastecimento nas linhas e células produtivas.
- Gerar dados no sistema ERP/Banco de dados e seus módulos, permitindo disponibilizar dados para gestão da operação e KPIs.

Com os objetivos descritos, o artigo está estruturado como um estudo de caso, de uma empresa Multinacional Alemã do ramo metalmecânico, situada na região norte de Santa Catarina, gerenciada por um sistema ERP e também WMS. E suas linhas de produção gerenciadas pelo sistema Kanban de requisição com cartões físicos para a gestão de abastecimento das linhas.

Assim, para gerenciar os processos de solicitação de reabastecimento das linhas de produção e células produtivas, com uma visão ampla e *on-line* dos processos de solicitação, separação e confirmação de abastecimento, em um cenário de linhas de produção gerenciadas por Kanban físico de requisição, **qual seria o melhor método para atingir os objetivos aplicando a informatização do atual cenário?**

2. CONCEITOS DE KANBAN E SISTEMAS INFORMATIZADOS

2.1. KANBAN

O processo Kanban tem como finalidade simplificar o fluxo de produção, mantendo as informações visíveis no chão de fábrica, corroborando com SPIM (2016, p. 409) "[...] Kanban é um sistema simples que tem a função de coordenar o fluxo de materiais e de informação durante todo o processo de fabricação de acordo com o sistema puxado".

Conforme cita Tubino (2009, p. 142), "Em um sistema puxado, os cartões kanban têm a função, conforme a finalidade para que se destinam, de substituírem as ordens de produção, de montagem, de compra ou de movimentação."

O início de uma atividade, envolve um comando, sendo este possível um sinal para cada operação do fluxo, assim cartões, caixas, *andons* entre outros sinais visuais, podem ser considerados KANBAN.

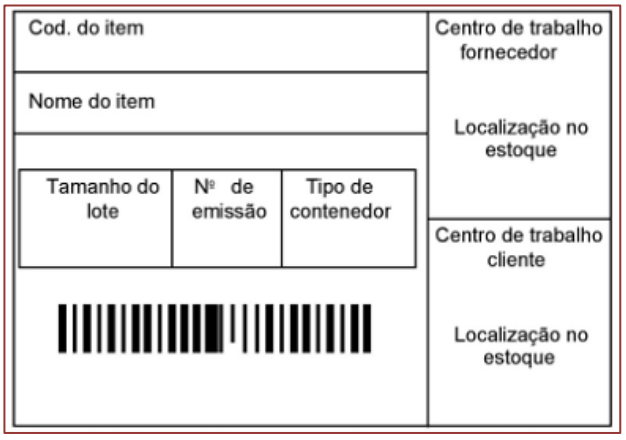
> Kanban, em japonês, significa sinal ou cartão, e pode ser considerado como o elo de uma corrente transportadora que leva um material por meio dos diversos estágios da cadeia produtiva de uma empresa. O kanban é um sinal enviado ao processo precedente pelo processo subsequente, informando que o material deve ser enviado. (BIAGIO 2015, p. 85).

A identificação dos itens tem papel primordial em sistemas gerenciados por Kanban, assim existem vários tipos de identificação, dependendo da aplicação ou gestão necessária.

Tubino (2009, p. 143), indica umas das finalidades da identificação e também exemplifica. "O cartão kanban terá sempre sua área de atuação restrita à relação entre o cliente e o fornecedor que podem ser internos ou externos. "

O cartão deve conter as principais informações das operações ou para a movimentação do processo, conforme cita Dennis (2008, p. 90), "Geralmente é um cartão dentro de um envelope retangular de vinil. Um kanban é uma autorização para produzir ou parar, e pode também conter outras informações relacionadas"

Figura 1 – Cartão Kanban



Fonte: Tubino (2009).

A identificação via etiquetas, pode estar no quadro KANBAN, no caso dos Kanbans de produção, sendo que para os KANBANs logísticos (Transporte e requisição), estes devem estar relacionados aos equipamentos ou embalagem.

Para Dennis (2008, p. 90), Não pode haver retirada de produtos sem um kanban. Um kanban deve acompanhar cada item. Devem ser retiradas apenas as peças indicadas na quantidade indicada.

O entendimento do kanban como uma ferramenta de gestão de fluxo, como um dos objetivos artigos é a sistematização do kanban utilizando a tecnologia de informação, as citações abaixo de Gonçalves (2013,p.270) e Dennis (2008, p. 90), dão credibilidade ao estudo aplicado.

Gonçalves (2013,p.270) cita Kanban entende a sistema do kanban como uma processo de controle de fluxo que pode ser substituído por sistemas eletrônicos:

> O Kankan é um sistema de controle de fluxo de materiais utilizado na produção. Ele utiliza um sistema de cartões que sinalizam a necessidade de reabastecer uma célula, movimentar um produto etc.Tem como meta a produtividade e a qualidade, interligando em um fluxo uniforme e ininterrupto todas as operações. Atualmente, esse sistema de cartões foi substituído por um sistema de gestão que utiliza a tecnologia da informação. (GONÇALVES, 2013,p.270).

Da mesma maneira que Dennis (2008, p. 90), cita a gestão do kanban podendo ser “Uma mensagem eletrônica em uma tela de computador também serve como um kanban”.

A aplicação do estudo está direcionada ao KANBAN de Fornecedor ou de requisição que envolve o abastecimento de uma linha, sendo esta a relação cliente de cliente exclusivos internos (almoxarifado para produção).

O quadro 1 é uma adaptação dos principais tipos de kanban, conforme Biaggio 2015:

Quadro 1 – Tipos de Kanban

Kanban de transporte	É utilizado para avisar o processo precedente que o material pode ser retirado do estoque e transferido para o processo subsequente. Nesse tipo de kanban, você encontrará informações como: número e descrição do componente ou material, local onde deverá ser retirado e local para onde deve ser enviado; BIAGIO (2015, p. 86).
Kanban de produção	È utilizado para informar a um pro- cesso produtivo precedente que ele pode iniciar a produção de um item para abastecer um estoque intermediário, que, no caso do controle por kanbans, é denominado supermerca- do. Normalmente, é utilizado para interligar áreas de produ- ção de componentes e áreas de montagem de produtos finais; BIAGIO (2015, p. 86).
Kanban do fornecedor	É utilizado para avisar ao fornecedor sobre a necessidade de ressuprimento de materiais ou componentes em um determinado estágio da produção. Este kanban é similar ao de transporte, porém utilizado com fornecedores. BIAGIO (2015, p. 86).

Fonte: Adaptado de Biagio 2015.

A quantidade de cartões vai terminar as necessidades de abastecimento e produção, assim a sua importância na gestão de estoques, pode estar relacionada na citação de Biagio (2015, p. 87), "O número de kanbans em circulação determina o nível de estoques."

Para Pozo (2015, p. 32):

> Também conhecido como peças em processos (WIP – Work In Process), esses estoques podem ou não ser restritos, isto é, possuir espaços delimitados e controlados; por isso, têm um fator altamente influente no custo do produto. Compõem esses almoxarifados as peças que estão em processo de fabricação, ou em subconjuntos, que são armazenadas para compor o produto final. O volume desse estoque é normalmente resultante de planejamento do estoque de matéria-prima e do planejamento da produção.

Seguindo o conceito de *jit,* o processo de abastecimento é realizado utilizando rotas fixas, conhecido como *milk run*. Corrêa (2010, p. 212), cita "Milk run: simboliza entrega ou coleta programada, sistemática."

O processo de transporte realizado para os abastecimento das linhas de produção, pode variar conforme a demanda produtiva, assim a variação das movimentações e a distância entre o Almoxarifado/supermercado ao ponto de utilização dos itens nas linhas, pode impedir o abastecimento direto, pois envolveria várias movimentações, para solicitações variáveis. Por este motivo o *milk run*, neste caso interno, por rotas de tempos fixos é a melhor solução para este, processo de transporte, assim corrobora Dennis (2008, p. 98) "O transporte de tempo fixo é preferível quando os processos são desconectados e as distâncias de transporte são longas. Rotas "milk run" ou fáceis de seguir podem ser facilmente elaboradas."

2.2. WMS E COLETA DE DADOS

A eficiência da logística, na sua raiz de serviço, está associada a qualidade e velocidade da gestão das informações, sendo que em um mundo onde as frequências de solicitações são maiores e o tamanho, em formato quantidade, cada vez menor, exigem uma maior agilidade nos armazéns, onde o sistema WMS pode auxiliar e alguns casos ser vital para o setor da logística com foco em distribuição.

De acordo com Valente (2016 p.329), "A fim de otimizar as operações de armazenagem e distribuição, o sistema WMS gerenciar efetivamente os recursos de espaço, estoques, equipamentos e pessoas."

Gonçalves (2013,p.194), entende a gestão de informações do WMS com a citação:

> O WMS gerencia todas as operações executadas e as informações geradas no armazém com alto nível de confiabilidade, mantendo um perfeito controle das operações e fornecendo informações precisas sobre os níveis de estoques dos diversos itens armazenados. De uma forma geral, pode-se dizer que o WMS permite mapear e rastrear todas as atividades do armazém, [...].(GONÇALVES 2013,p.194).

Segundo Banzato (2005, p. 51), "[...] a armazenagem exige muito mais que simples procedimentos automatizados, ela necessita de sistemas de informações que possam tomar decisões rápidas e inteligentes".

O processo de gestão de integrações de informações entre o físico e sistema, pode ser interagido com equipamentos de coleta dados,

De modo que Valente (2016, p. 346) entende a aplicação citando:

> O coletor de dados é um equipamento portátil usado para a coleta de informações, posteriormente utilizadas em um sistema específico, tal como controle de estoque, controle de consumo, relatórios em geral, inventário de estoque etc.

Conforme Stair (2013, p. 335), confirma a aplicabilidade da coleta de dados, "Coletar e reunia todos os dados necessários para contemplar o procedimento de transação é chamado de coleta de dados".

As confirmações das operações no sistema WMS, podem ocorrer com a utilização de integrações com hardwares, através de integrações com sistema coletas de dados para confirmação das separações.

Gordon (2006, p 233), "Eles dão apoio para á verificação dos itens selecionados contra a lista de escolha através do código de barras ou outro meio."

Banzato (1998, p 82), cita os tipos de equipamentos básicos, "[...] tipos de hardwares podem ser necessários tais como: Leitores de óticos (scanners), terminais de radiofrequência, [...]".

Para Moura (2003, p 33),

> A coleta automática de dados é usada para conformar a localização e o SKU que é separado. A confirmação da separação, pela leitura dos endereços e itens dispostos nestes é um, atributo do WMS, pois estas coletas permitem confirmação da movimentação da atividade.

A necessidade da velocidade do fluxo de informações, assim como a segurança destas e da operação, torna a necessidade da coleta de dados necessárias para o WMS, assim corrobora com Banzato (2005), "O WMS trabalha com informações em tempo real, provenientes da leitura do código de barras, assegurando alto índice de precisão nas operações."

A figura 2 apresenta um exemplo de coletor de dados.

Figura 2 – Coletor de dados

Fonte – https://www.honeywellaidc.com/

Para rápida captura, os coletores de dados, necessitam de integrações sem fio e captura de caracteres codificados, em códigos de barras, QR-code, entre outros, pois a informação, pode esta definida na imagem capturada, porém o registro desta deve ser repassado para o sistema. Valente (2016 p.329), cita a utilização da captura de informações via código de barras. "[...] utilizam tecnologias de Auto ID Data Capture, como código de barras, dispositivos móveis e redes locais sem fio para monitorar eficientemente o fluxo de produtos."

Gonçalves (2004,p.92), indica a informação unitária do produto com códigos de barras. "A necessidade de criar uma linguagem única que permite identificar, de forma segura, cada item de material. "

O autor continua afirmando que, cada item, após classificado e identificado deve ser codificado, o que consiste em atribuir números ou letras e números. Esta codificação deve ser de tal forma que possa representar as características particulares de cada material.

Neste ponto, a imagem coleta, está para facilidade da ergonomia de leitura, todavia a informação registrada na imagem, deve ser única e exclusiva, permitindo a rastreabilidade da operação e dados unitários.

Moura (2003,p.36) tem a mesma visão de Gonçalves (2004,p.92), afirmando, "que deve ser colada uma etiqueta, manual ou via computador, em cada volume identificando lote, marca, data do recebimento e destino da mercadoria."

Uma das principais ferramentas para de identificação e gestão física e sistêmica, com controles relacionados às movimentações, são os códigos de barras contendo identificador únicos, relacionados ao banco de dados registros no sistema.

Banzato (1998, p 36), confirma a utilização e a finalidade deste meio de identificação, "Permite a geração de etiquetas de recebimento e estocagem [...]"

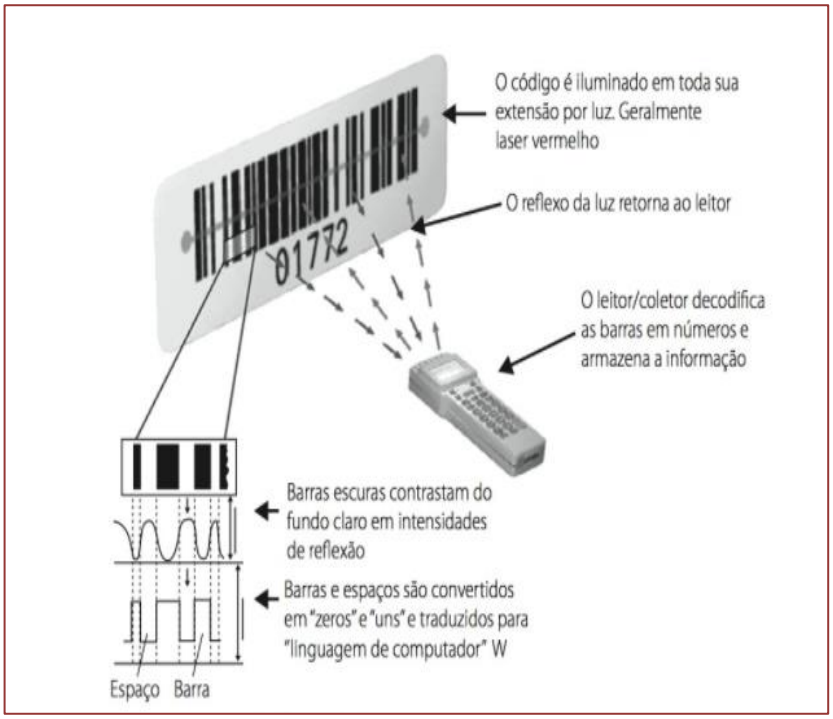
Gonçalves (2013,p.59), cita o código de barras como uma ferramenta evitar possíveis falhas de processo: "O código de barras foi desenvolvido com a finalidade de evitar a transcrição de dados por meio da digitação, o que acabava por provocar um grande volume de erros e, consequentemente, exigia um retrabalho. "

A figura 3 apresenta um exemplo de impressora com capacidade para impressão de código de barras.

Figura 3 – Impressora código de barras

Fonte- https://www.honeywellaidc.com/

Figura 4 – Leitura código de barras



Fonte – Gonçalves (2013,p.60).

Os códigos de barras permitem a utilização de coletores de dados, para integrar a informação física com os sistemas. Valente (2016, p. 346), indica a utilização da coleta de dados e exemplifica a aplicação deste. “Os coletores de dados portáteis leem códigos de barras ou etiquetas RFID, transferindo os dados coletados no campo até o escritório para serem processados.”

A informação coletada e registrada no banco de dados, permite a realização das operações e análises necessárias, corroborando com Valente (2016, p. 329), “Após a coleta de dados, o sistema faz a sincronização com uma base de dados centralizada, que pode ser por processamento de todo um lote ou por transmissão em tempo real pelas redes sem fio.”

O processo de organizar e armazenar as informações pode ser importante para a tomada de decisões e gestão no mundo empresarial, principalmente pela agilidade de fornecida pela organização dos dados. Stair (2013, p 169), confirma esta agilidade no seguinte texto: “Um banco de dados pode contribuir para o sucesso de uma organizacional fornecendo aos gerentes e aos tomadores de decisão informações relevantes, precisas e no momento certo, com base em dados.”

Conforme Stair (2013, p 189), “aplicações de banco de dados manipulam o conteúdo de um banco de dados para produzir informações úteis”. Este processo de gerenciamento e extração das informações, será utilizado no processo de melhoria, foco deste projeto.

As informações em um banco de dados, normalmente estão relacionadas a um sistema de ERP, que permite a gestão das informações e operações das empresas. SPIM (2016, p. 409), [...] empresas terem um sistema Enterprise Resource Planning (ERP) para gerenciar e controlar os materiais, mas a necessidade de fazerem-se esses controles [...]

3. APLICAÇÃO

O estudo foi aplicado como um estudo de caso, em uma empresa Multinacional Alemã do ramo metalmecânico, situada no estado de Santa Catarina, gerenciada pelo sistema ERP e com almoxarifado utilizando um sistema WMS integrado ao ERP.

O cenário atual já existe uma gestão física de Kanban de abastecimento, assim o aculturamento do processo, a nível de negócio, não foi o objetivo do estudo, mas sim informatizar este processo.

Nos próximos tópicos, serão apresentados uma breve descrição do atual processo, aplicações informatizadas desenvolvidas e a utilização destas no processo.

3.1. CENÁRIO ANTERIOR A APLICAÇÃO

O atual processo de gestão de Kanban de requisição da empresa, é realizado pela gestão do cartão impresso associado a caixa BIN. Este cartão fica associada a caixa por um processo de envelope, permitindo o operador retirar quando finaliza a quantidade da caixa. Este cartão é disponibilizado no quadro para retirada do Milk run e são encaminhados por este processo de movimentação para o almoxarifado onde são reabastecidos.

Figura 5 – Imagem ciclo Milk Run e solicitação de abastecimento

Fonte: SILVA (2007).

Os cartões movimentações pelo Milk run, são direcionados para o almoxarifado Central, que dentro da metodologia Lean é considerado o Supermercado de reposição.

Os operadores recebem estes cartões e procuram os itens em suas posições possíveis de armazenagem, caso o material não esteja neste, o operador pesquisa o saldo do item e nos outros possíveis lugares. Como neste caso ainda não existe um sistema de endereçamento (EX: WMS), o operador deve procurar estes no almoxarifado.

Localizado o item o operador abastece a caixa na quantidade múltipla informada no cartão e disponibiliza os volumes/caixas nos carros de transporte do Milk run. Conforme horário pré-determinado, o Milk Run realiza o abastecimento dos postos de trabalho seguindo as rotas terminadas.

Para cada parada do Milk Run, este deve verificar se existem volumes para serem enviados aos postos de trabalho. Caso exista, o operador do milk run, disponibiliza os volumes nos postos de trabalho, conforme identificado no local físico e correlacionado a informação do cartão.

Figura 6 – Flow-rack linda de produção – Posição de trabalho

Fonte: SILVA (2007).

3.2. IMPLANTAÇÃO SISTEMA WMS SETOR ALMOXARIFADO

Para atender o processo de integração das informações entre as solicitações e o almoxarifado central, foi implantado um sistema de WMS integrado com sistemas de coleta de dados via coletores de dados.

O processo de WMS, abrange as operações:

- Recebimento e identificação de itens;
- Armazenagem;
- Gestão de posicionamento;
- Alocações de movimentações de saída;
- Processo roteirizado de separação;
- Inventários;
- Funcionalidades de Gestão de operações e KPIs.

Para o processo foco do deste artigo o WMS, será a ferramenta de atendimento das necessidades originadas pelas leituras de cartões Kanbans, assim não serão detalhados os processos gerenciados pelo WMS.

A aplicação do estudo de caso, não serão detalhados maiores processo do WMS, devido objetivo do processo é a informatização do KANBAN, sendo o WMS uma ferramenta para esta atividade, mas a gestão realizada pelo WMS no Almoxarifado não será detalhado neste estudo.

3.3. PROCESSO DE SOLICITAÇÃO E ABASTECIMENTO KANBAN

O processo de solicitação está relacionado ao operador requisitar o reabastecimento do item utilizados em uma estação de trabalho, controlados por um processo de Kanban de requisição. Com o processo sistematizado, conforme finaliza a caixa contendo a etiqueta de identificação do KANBAN, via coletor de dados ou leitor conectado a um terminal, realiza a leitura do código de barra da etiqueta de identificação da embalagem.

A leitura deve gerar um documento de separação no WMS, para o item e quantidade associada ao código de barras lido, onde conforme cadastro e parametrizações que serão detalhadas no próximo tópicos, deve gerar uma necessidade de abastecimento do ponto de entrega que é o posto de trabalho.

Os processos de separações das solicitações, devem ser gerenciadas pelo WMS do Almoxarifado/Supermercado da área de estocagem, assim as movimentações de alocações e coletas, seguiram as regras do WMS e suas funcionalidades parametrizadas para o item e lote, onde cada leitura de solicitação de abastecimento gerada na estação de trabalho, deve gerar uma necessidade de separação no WMS.

Finalizada a separação do item, este deve ser acondicionado na embalagem deles, neste caso a embalagem BIN, identificado com uma nova etiqueta, contendo as informações impressas do posto de trabalho/ponto de entrega e acondicionadas nos carrinhos de abastecimento de linhas.

Os carrinhos de abastecimento de linhas, seguem uma rota chamada de milk-run. No processo de saída o operador do milk-run, deve informar a rota que deverá realizar, para que o sistema possa apresentar os pontos de entrega necessários de parada na rota. Chegando no ponto de entrega, o operador realiza as entregas das embalagens preparadas no almoxarifado e confirmando via leitura do código de barras do ponto de entrega e das embalagens para entrega, para que o sistema possa verificar a relação embalagem X ponto de entrega. Nesta mesma operação são retiradas as embalagens vazias para devolver para o almoxarifado.

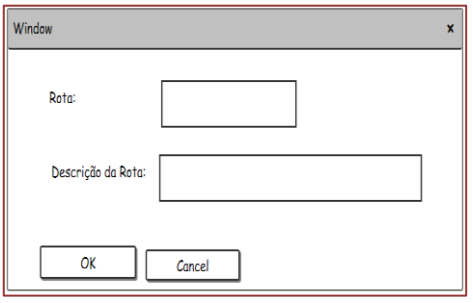
3.3.1. CADASTROS DE ROTAS E PONTOS DE ENTREGA

Para definição dos pontos de entregas e rota do Milk Run, permitindo o sistema registrar a associação dos itens aos pontos de entrega, será necessário o desenvolvimento de um cadastro para definição de rotas e pontos de entrega.

Foi desenvolvido um programa de cadastro simples para a manutenção das informações de rotas de entrega nas linhas de produção. O protótipo da tela de cadastro de rotas pode ser conferido na figura 7 na p. 15.

Figura 7 – Esboço de tela e exemplo do cadastro de rotas

Rota	Descrição
01	Rota de entrega Linha 01
02	Rota de entrega Linha 02
03	Rota de entrega Linhas 03, 04 e 05



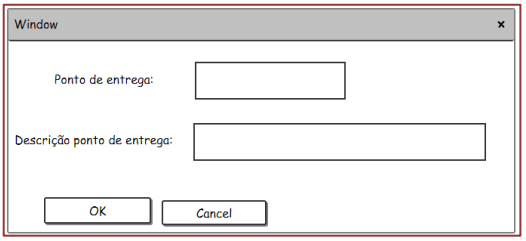
Fonte: Primária (2018).

Também foi desenvolvido um programa de cadastro simples para a manutenção das informações de ponto de entrega nas linhas de produção, conforme pode ser conferido na figura 8. Os pontos de entrega são um conjunto de posições físicas ex: prateleiras, Flow

Racks, etc, associadas, para que o Milkrun possa parar e abastecer e recolher as caixas vazias.

Figura 8 – Esboço de tela e exemplo cadastro de pontos de entrega

Ponto de entrega	Descrição
A-01	Centro de trabalho A Posição 01
A-02	Centro de trabalho A Posição 02
A-03	Centro de trabalho A Posição 03
A-04	Centro de trabalho A Posição 04
A-05	Centro de trabalho A Posição 05
A-06	Centro de trabalho A Posição 06



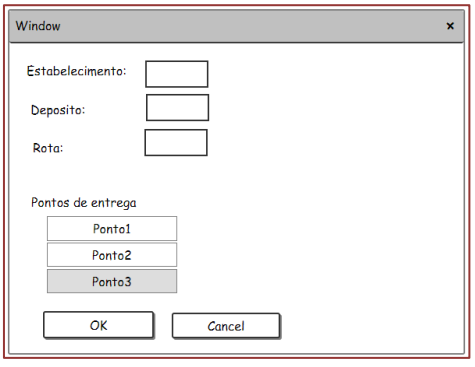
Fonte: Primária (2018).

Para associar os pontos de entrega a rota, foi desenvolvido o programa de relacionamento entre os pontos de entrega e rotas. O programa deve apresentar o estabelecimento, depósito e rota a vários pontos de entrega. O protótipo de tela deste programa de relacionamento pode ser conferido na figura 9.

Figura 9 – Esboço de tela e exemplo de cadastro de relacionamento Rota X pontos de entrega

Rota	Ponto de entrega
01	A-01
01	A-02
01	A-03
01	A-04

Rota	Ponto de entrega
02	B-01
02	B-02
02	C-02
02	C-01
02	D-01
02	D-02



Fonte: Primária (2018).

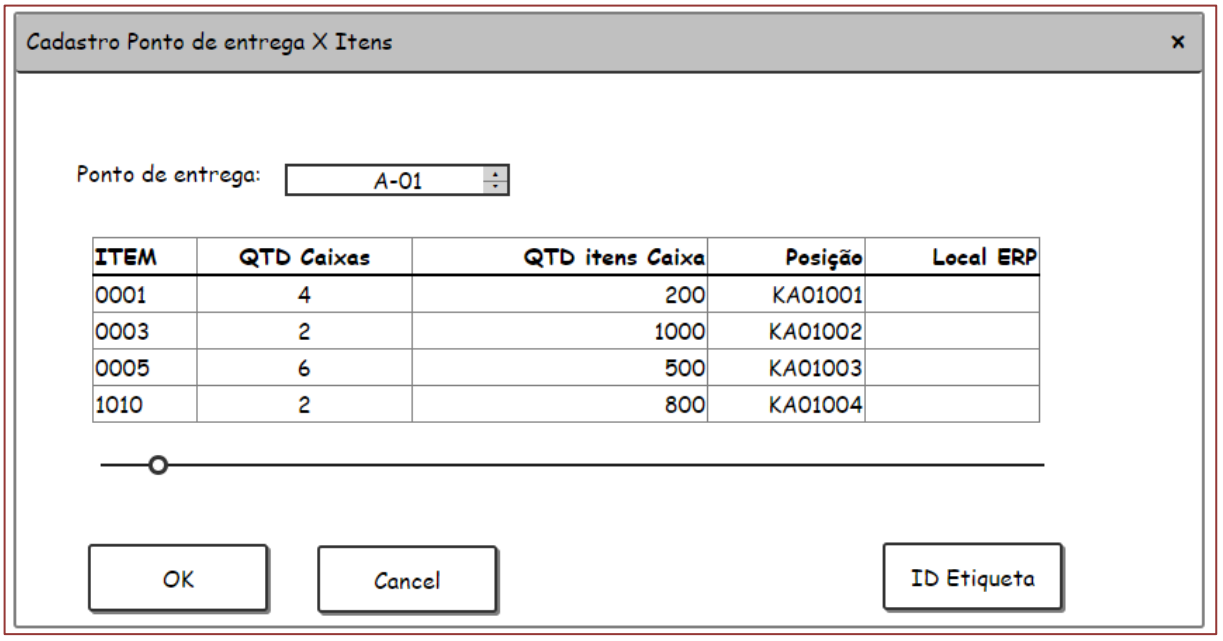
A composição de uma rota, será a relação de pontos de entrega associadas a ela, assim este programa permite o usuário associar estas informações, assim como o depósito do ERP que será considerado este saldo.

As rotas relacionadas aos pontos de entrega devem seguir o layout físico e o caminho/Rota do equipamento de transporte do milk run. Abaixo temos uma imagem exemplo de como seria a relação de cadastros considerando a rota e os pontos de entrega nas linhas de produção e ou células (Figura 10).

A associação do ponto de entrega, com os itens, posições e o gerenciamento das quantidades, deve ser realizado pelo cadastro apresentado no também protótipo da Figura XX denominado *Cadastro ponto de entrega X itens*. Cada posição, é uma localização física ou endereço onde os volumes (caixas), serão armazenadas na linha de produção.

O processo permite gerenciar o (s) Item (s) que podem ser associados a uma posição, sua quantidade de caixas e quantidade de itens em cada volume.

Figura 10 – Esboço de tela e exemplo de cadastro ponto de entrega X Itens



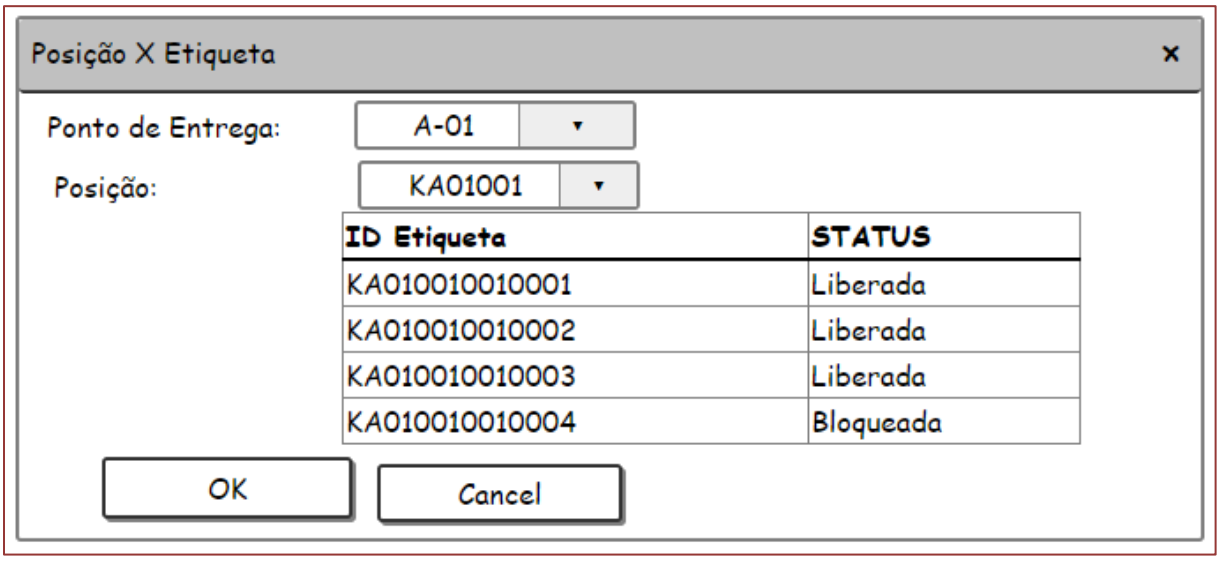
Ponto de entrega	QTD Caixas	QTD Itens Caixa	Posição	Local ERP
A-01	4	200	KA01001	
A-01	2	1000	KA01001	
A-01	6	500	KA01001	
A-01	2	800	KA01001	

Fonte: Primária (2018).

Compartilhando o cadastro de ponto de entrega X Itens, foi desenvolvido o cadastro *posição X etiqueta*, permitindo associar ID únicos das etiquetas a relação do ponto de entrega X posição X itens. Também, possibilita gerenciar o status da etiqueta, permitindo bloquear, assim na leitura de solicitação o sistema não gera movimentação.

Este id deverá ser impresso para identificar as caixas, possibilitando a leitura da solicitação de reposição do KANBAN.

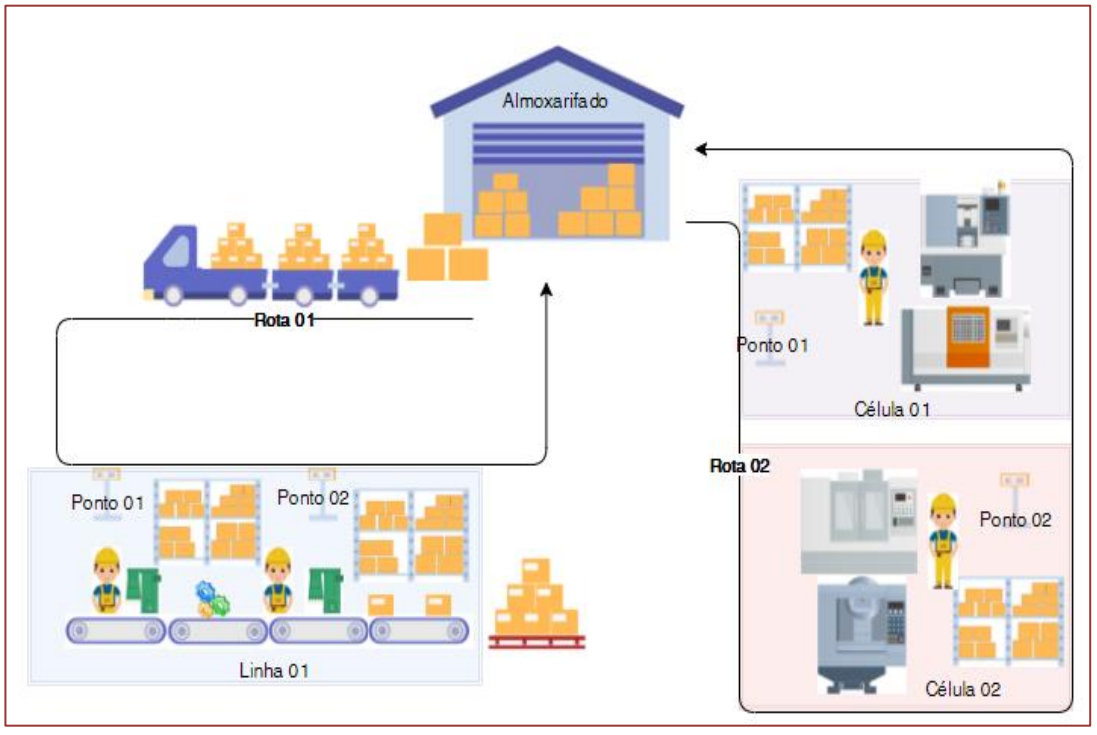
Figura 11 – Esboço de tela e exemplo de Posição X Id etiqueta



Ponto de entrega	Posição	Item	Id Etiqueta	Posição
A-01	KA01001	001	KA010010010001	Liberada
A-01	KA01001	001	KA010010010002	Liberada
A-01	KA01001	001	KA010010010003	Liberada
A-01	KA01001	001	KA010010010004	Bloqueada

Fonte: Primária (2018).

Figura 12 – Exemplo Layout de Rotas e pontos de entrega do milk run



Fonte: Primária (2018).

A composição de uma rota, será a relação de pontos de entrega associadas, assim este programa permite o usuário associar estas informações, assim como o depósito do ERP que será considerado este saldo.

3.3.2. PROCESSO DE SOLICITAÇÃO DE REPOSIÇÃO KANBAN

A etiqueta (cartão) a ser lida para gerar a solicitação de Kanban deve ser uma cadastrada no programa *posição X etiqueta*. Com base nestas informações o sistema buscará na tabela KANBAN a quantidade. A rota será associada a solicitação com base nas informações e posição e ponto de entrega, conforme cadastros no tópico *3.3.1 Cadastros de rotas e pontos de entrega.*

Utilizando um leitor/coletor de dados, o operador da produção deve ler as etiquetas do material consumido (caixas vazias). Esta operação deve gerar um documento de saída no WMS, para que a operação do almoxarifado central possa efetuar a separação dos itens solicitados.

Abaixo estão demonstrados os protótipos de telas para o programa:

Figura 13– Esboço telas do Processo Solicitação de reabastecimento via coletor de dados

Fonte: Primária (2018).

Após informado os dados para conexão ao sistema demonstrados, o operador deverá efetuar a leitura das etiquetas de kanban das embalagens vazias. Nesta leitura o sistema deve registrar a necessidade de abastecimento e apresentar a conclusão da solicitação, caso apresenta alguma validação ou erro, será também apresenta nesta *Frame*. Caso o operador realize mais de uma vez a leitura da etiqueta, o sistema apenas registra a operação inicial, pois cada etiqueta tem um ID único e será registrado o status do processo, onde conforme confirmação positiva deve passar de *abastecida* para *solicitada.*

O documento WMS a ser gerado é resultado de um processo de transferência entre os depósitos, e será identificado através de uma numeração específica “Kanban” + Rota + Data, facilitando para o operador identificar a rota e datas no processo de separação.

A quantidade do movimento do item será a registrada, para gestão das informações, assim quando a etiqueta lida for referente a mesma rota de uma etiqueta já lida anteriormente e um documento com aquela rota já estiver criado para o mesmo dia, então será feito um

incremento no mesmo documento. Ou seja, não será gerado um documento por etiqueta lida, e sim um documento por Rota + Data.

Ex: documento gerado no dia 07/10/2020 para a rota 05 teria o número "Kanban0507102020". Ou seja, os documentos gerados na solicitação de Kanban serão gerados por rota e data, como exemplo acima um documento gerado dia 07/10/2020 para a rota 05 teria número "Kanban0507102020", assim se duas etiquetas fossem lidas para a rota 05 no dia 07/20/2020 não seriam criados dois documentos. Pois, os materiais de uma mesma rota e data seriam colocados sob um mesmo documento WMS. Também esta gestão evita que o operador lei várias vezes a mesma etiqueta, pois somente será gerada uma nova separação/atendimento da solicitação, se este cartão não estiver com status de movimentação de "o reposição".

3.3.3. PROCESSO DE SEPARAÇÃO DA SOLICITAÇÃO DE REPOSIÇÃO DO KANBAN

O processo de separação dos itens no almoxarifado, para atendimento das solicitações de abastecimento do kanban, será realizado pelo sistema WMS, implantado no almoxarifado central, assim as rotinas de alocações, como exemplo FIFO/FEFO, roteirização, etc. são atendidas por este. Assim, salvo o processo de associação das necessidades de separação com os Kanbans solicitados e gestão de rota os atendimentos do WMS, seguem as funções padrões.

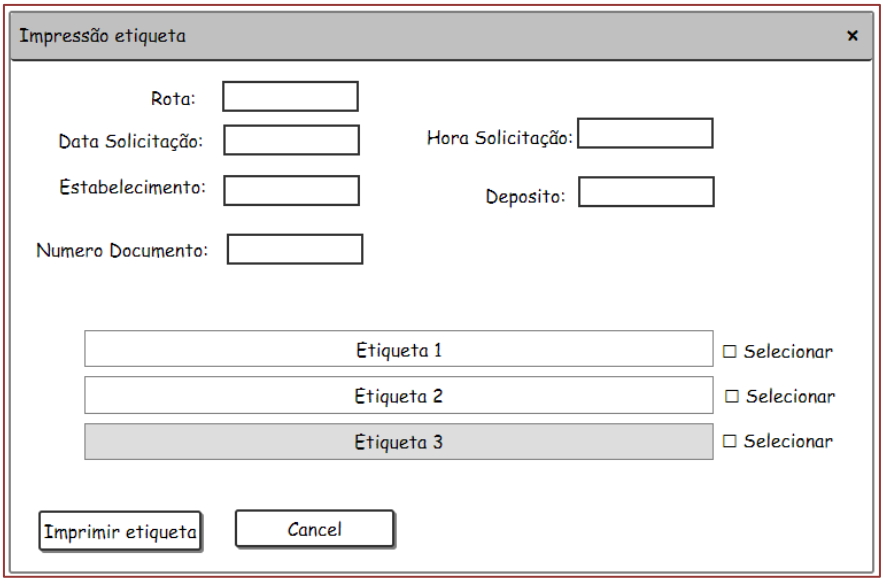
3.3.3.1. IMPRESSÃO DE ETIQUETAS DE KANBAN

Sempre que lida a etiqueta na solicitação de reposição do volume do ponto de entrega (vide tópico *3.3.2 Processo de solicitação de reposição Kanban*), ela pode ser descartada, pois o registro da necessidade foi realizado no sistema. Assim a atividade realizada antes da implantação do processo proposto, onde o operador teria que disponibilizar o cartão para o *milk-run*, recolher e disponibilizar ao almoxarifado, não será mais necessária.

O setor de almoxarifado, via WMS e ERP, acompanha as necessidades de separação, via monitor/CPU dispostos no setor. Neste equipamento a primeira operação de atendimento será a impressão das novas etiquetas de KANBAN, lidas nas linhas para o processo de reposição.

A atividade de atendimento de separação do Kanban deve iniciar pela impressão das etiquetas de identificação do KANBAN. Como existe uma associação de horas e rotas, o operador deve selecionar a rota que será atendida, para deste modo o sistema conseguir identificar as movimentações de solicitação geradas pela leitura das etiquetas na linha de produção. A ordenação da impressão de etiquetas será o roteiro de separação (alfanumérico) dos endereços alocados para o documento de saída do WMS, assim a sequência de impressão de etiquetas seguirá o mesmo roteiro de separação, apresentado da figura 15:

Figura 14 – Esboço programa executável em monitor/CPU para impressão de etiquetas



Fonte: Primária (2018).

As etiquetas impressas devem conter as informações do item, posição kanban, entre outras, assim como o código de barras contendo o Cod. Item, posção Kanban, rota e ID. Com as etiquetas em mãos, no coletor de dados o operador deverá iniciar a separação.

Figura 15 – Esboço Etiqueta KANBAN

Fonte: Primária (2018).

Esta etiqueta descartável, contendo um ID único, permite o controle das operações que são realizadas, desta maneira, é possível consultar via sistema o status da operação de cada etiqueta, definindo os seguintes status da operação Quadro 2:

Quadro 2 – Status sistema da etiqueta de Kanban

Status	Descrição do Status da Operação
Solicitada	O operador realizou a leitura da etiqueta na linha de produção, solicitando o reabastecimento, gerando um movimento de separação no WMS. Conforme processo descrito no tópico *3.3.2 Processo de solicitação de reposição Kanban.*
Pendente separação	Foi impressa a nova etiqueta física no almoxarifado e será realizada a separação no WMS. Conforme processo descrito no tópico *3.3.3.1Impressão de etiquetas de Kanban*
Separada	A atividade de separação do item foi realizada via WMS, identificado o volume e disposto no equipamento de transporte do *milkrun.* Conforme processo descrito no tópico *3.3.3.2Processo de separação*
Abastecida	O *milk run,* realizou a atividade de confirmação de abastecimento do posto de trabalho.O sistema realizou a transferência do saldo do sistema do depósito de almoxarifado para o depósito de processo. Assim, o volume está disponível para a operação e quando finalizar, ser solicitado o reabastecimento. Conforme processo descrito no tópico *3.3.4 Processo de confirmação de abastecimento Kanban*

Fonte: Primária (2018).

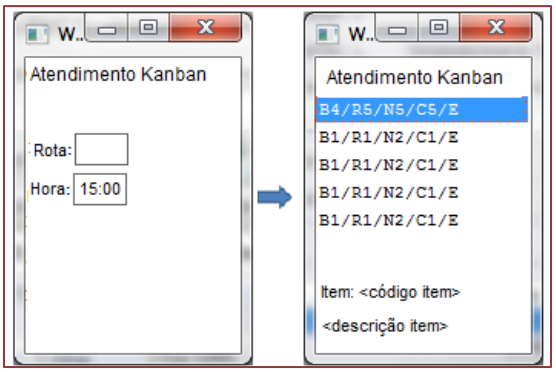
3.3.3.2. PROCESSO DE SEPARAÇÃO

Para separação, o operador deverá acessar o programa *Atendimento KANBAN,* Apresentado na figura 16 e informar o número do equipamento de transporte (carrinho) no campo "equipamento", então, seguir o atendimento das separações integradas ao WMS. Para os casos onde a associação de tarefa por usuário é feita pelo próprio operador quando este acessa a lista de tarefas pendentes através do coletor é necessário a correta parametrização dos equipamentos para que o acesso fique restrito conforme o equipamento utilizado pelo operador. E assim, não ocorra casos onde a mesma tarefa é feita por mais de um operador.

Como o processo de abastecimento, atende as operações de milk-run internas, a gestão de separação ocorre por rota e hora, permitindo o operador selecionar as necessidades de uma determinada rota até a hora informada, sendo este última informação o corte das atividades.

Exemplo, o operador informa a rota 01, hora 13:00, serão apresentadas todas as solicitações de abastecimento que ocorreram nos pontos de entrega associados a rota 01, conforme processo descrito no tópico **3.3.2 Processo de solicitação de reposição Kanban.**

Figura 16– esboço telas processo de separação no armazém controlado pelo WMS



Fonte: Primária (2018).

Informada a informa a rota que será atendida e a hora da solicitação, serão apresentas a atividades de separação roteirizadas pelo WMS. Neste processo a atividade segue as rotinas do atual WMS.

Conforme rotina padrão do sistema wms, as tarefas apresentadas, são os endereços para o operador se deslocar para retirada do material. Selecionada uma tarefa no coletor, conforme figura 15, será solicitado a leitura do endereço desta respectiva tarefa e também a leitura da embalagem que está no endereço. Após a leitura da etiqueta da embalagem será solicitado ao usuário a quantidade a ser movimentada e, então, a operação de atendimento kanban desta respectiva tarefa estará encerrada.

Finalizada a separação, o operador deve identificar as caixas com as etiquetas impressas no começo da operação.

O operador deve disponibilizar os volumes separados e identificada, no equipamento de transporte de maneira organizada por rota de entrega.

Figura 17– Fotos carrinhos abastecidos

Fonte: SILVA (2007).

3.3.4. PROCESSO DE CONFIRMAÇÃO DE ABASTECIMENTO KANBAN

Os materiais separados conforme solicitação de separação do Kanban estarão disponíveis nos equipamentos de transporte (carrinhos). O milk run deverá retirar estes carrinhos e conduzi-los para os postos da linha, onde, via coletor de dados, informar a rota (Figura 18). E, então, deverá apresentar os destinos dos itens (ponto de entrega).

Após informado a rota, o sistema apresenta a tela de pontos de entrega, apresenta a tela de coletor de dados com os pontos de entrega. Somente serão apresentados os pontos de entrega da rota, onde foram solicitados abastecimentos, conforme descrito tópico **3.3.2 Processo de solicitação de reposição Kanban,** e também atendidos via separação e identificação, conforme descrito no tópico **3.3.3 Processo de separação da solicitação de reposição do Kanban.**

Apresentando somente as atividades pendentes de entrega, que é um reflexo dos volumes disponíveis no equipamento de *milk run*, auxilia o operador para somente realizar as paradas nos pontos de entregas com pendência de abastecimento. Antes da aplicação do sistema, o operador teria que para em todos os pontos de entrega para validar se tinha pendências de entregas.

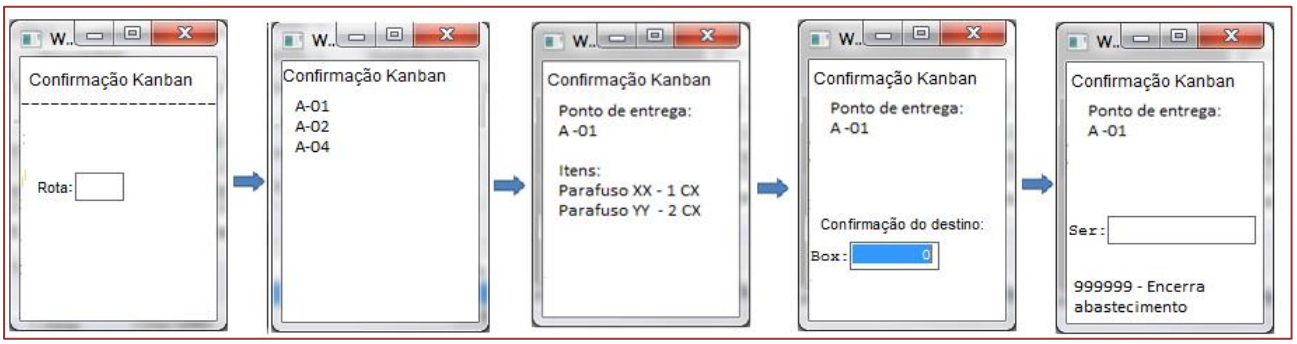
Selecionado o ponto de entrega, são apresentados os itens que devem ser entregues no ponto e suas quantidades. O processo de abastecimento físico, inicia com a leitura do código de barras do endereço do ponto de entrega.

Confirmada a leitura do endereço o operador deve efetuar a leitura das etiquetas dos volumes que serão abastecidos no endereço/ponto de entrega.

O processo é cíclico, ou melhor o operador pode ler todos os volumes que são destinados ao endereço de picking. Volumes que não pertence ao ponto de entrega, se lidos o sistema apresenta mensagem de erro, informado a operação indevida.

Quando o operador quiser encerrar o abastecimento do local no sistema, ele deverá digitar no campo “serial” o comando “999999”. Lembrando que esta confirmação deve ser feita após a leitura de todas as caixas. Assim que o sistema receber a entrada do comando “999999” as transferências entre depósitos no ERP serão realizadas, sendo o depósito de origem Almoxarifado e destino associado a relação rota X ponto de entrega .

Figura 18 – Esboço telas do processo de confirmação de abastecimento via coletor de dados



Fonte: Primária (2018).

3.4. GANHOS IDENTIFICADOS

Iniciado o ciclo de aplicação dos desenvolvimentos e processo, alguns benefícios foram identificados e possibilidades de melhorias futuras, conforme Quadro 3:

Quadro 3 – Relação de situação de ganhos identificados

Situação	Ganho
O cartão precisa ser disponibilizado fisicamente nas linhas e para o milk run retirar recolher para o almoxarifado para assim iniciar a separação.	Diminuição do *lead time* entre a separação e preparação dos itens solicitados, pois quando solicitada o abastecimento o almoxarifado pode iniciar a preparação.
Perdas de cartões devido a movimentação física destes.	Sem a necessidade da gestão do cartão físico e com o acompanhamento dos status das movimentações dos cartões, permite a rastreabilidade das operações.
O *milk run* tem que sair para a rota mesmo vazio, pois precisava recolher os cartões e caixas	O milkrun pode avaliar se precisa recolher as caixas vazias. Com a informação da quantidade de solicitações de ressuprimento, significa que existem poucas caixas vazias, assim o *milk run* não precisa realizar a rota, caso tenha poucos recolhimentos.
O *milk run* precisa parar em todas os pontos das linhas para recolher os cartões.	Sem a necessidade da gestão do cartão físico, a operação não precisa ser mais realizada.
O **milk run** precisa parar em todos os pontos de entrega para verificar se existe necessidade de abastecimento.	O coletor de dados, apresenta os pontos de entrega que contém carga para abastecimento, evitando que este pare no ponto sem ter carga para abastecer.
Pouco controle de saldos nas posições das linhas, o analista de logística precisa avaliar no físico os cartões.	Com os dados registrados no ERP, contendo os status dos cartões, (*Abastecido, pendente de abastecimento, em separação e em abastecimento*) O analista consegue avaliar o os saldos e os cartões de forma *online*.
Pouca visualização dos saldos no sistema.	Processo online de saldo, permitindo o saldo ser transferido no momento da operação, garantindo a visualização sistema igual a física.
Estoque para garantir o tempo do ciclo de reabastecimento.	O estoque tende a diminuir, pois o *lead time* de atendimento é menor se comparado à situação anterior.
KPIs pouco confiáveis ou difíceis de manter atualizados.	Com o registro *online* das movimentações é possível gerar vários *KPIs* e mantê-los atualizados. Ex: Quantidade de giro do cartão, Quantidade de cartões pendentes de abastecimento, etc.

Fonte: Primária (2019)

3.5. SÍNTESE DA RELAÇÃO OBJETIVOS X PROCESSOS DESENVOLVIDOS

Os desenvolvimentos de processo e programas, objetivos do estudo, foram realizados e aplicados. Conforme quadro 4 que apresenta a relação entre os objetivos e atividades:

Quadro 4 – Relação objetivos X Processos desenvolvidos

Objetivo	Processo desenvolvido
Desenvolver um processo de cadastro de Pontos de entrega e relacionamento com a rota do Milk run, gerando uma rotina sistemática.	Tópico *3.3.1 Cadastros de rotas e pontos de entrega.* Desenvolvidos cadastros e relacionamento sistemáticos para gestão de rotas e pontos de entregas.
Automatizar via coletor de dados o processo de requisição de abastecimento do Kanban, via leitura dos cartões Kanban.	Tópico *3.3.2 Processo de solicitação de reposição Kanban.* Desenvolvido processo via coletor de dados para o operador gerar as solicitações de ressuprimento do posto de trabalho.
Desenvolver via sistema informatizado a gestão das solicitações de abastecimento de linhas e células produtivas. Integrando com o WMS a gestão da separação e a identificação dos volumes separados	Tópicos: *- 3.3.3 Processo de separação da solicitação de reposição do Kanban* *- 3.3.3.1 Impressão de etiquetas de Kanban* *- 3.3.3.2 Processo de separação.* Desenvolvido processo de gestão de solicitações e atendimentos via WMS, assim como novo processo de identificação dos produtos.
Informatizar o processo de confirmação de abastecimento de linhas e células produtivas, para informar o milkrun as necessidades de abastecimento e a confirmação do abastecimento nas linhas e células produtivas.	Tópico: *3.3.4 Processo de confirmação de abastecimento Kanban.* O processo de roteirização de abastecimento do milk run foi informatizado, gerando eficiência dos recursos pela sua utilização apenas conforme necessidade. Também o desenvolvimento do processo de confirmação de abastecimento das linhas via coletor de dados.
Gerar dados no sistema ERP/Banco de dados e seus módulos, permitindo disponibilizar dados para gestão da operação e KPIs	Os processos desenvolvidos geram dados no banco de dados do ERP, permitindo utilizar estes dados para gerar informações para a gestão da operação, como exemplo a quantidade de cartões e seus status operacionais, quantidade de movimentações do milk-run, giro do cartões, etc.

Fonte: Primária (2019).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cenário anterior de abastecimento de linhas, controlado via cartões físicos, apresentavam algumas deficiências, principalmente na gestão e disponibilidade das informações.. A aplicação do estudo, apresentou uma nova modalidade de gestão, aplicando as visões gerenciais a aplicando novos conceitos de mercado.

A aplicação do trabalho foi realizada em uma empresa Multinacional Alemã do ramo metalmecânico, situada na região norte de santa Catarina, porém nem todas as telas

desenvolvidas, assim como detalhes de dados mais específicos foram disponibilizados para o estudo. Porém as telas são esboços fieis se relacionado as funcionalidades dos programas desenvolvidos.

Assim as melhorias de processo e objetivos alcançados, podem ser visualizados na relação de objetivos atingidos conforme já exposto no quadro 4 e os ganhos identificados, conforme quadro 3. Desta maneira o problema objeto do estudo, de desenvolvimento de um método informatizado para gestão do Kanban, foi atendido com um conjunto de métodos processuais envolvendo o estudo de negócio e a aplicação de processos informatizados utilizando como base os sistemas WMS, ERP e desenvolvimentos.

Com a introdução do processo informatizado, forma gerados inúmeros dados e com estes algumas informações iniciais para gestão do processo. Deste modo, sugere-se para novos trabalhos um novo estudo somente na validação de dados e na transformação destes em informações gerenciais, aplicando conceitos de *KPIs* em visões de Dashboards.

REFERÊNCIAS

[1] ANTUNES, José. **Sistemas de produção [recurso eletrônico]**: conceitos e práticas para projeto e gestão da produção enxuta – Porto Alegre : Bookman, 2008.

[2] BANZATO, Eduardo. **Tecnologia da informação aplicada à logística**. São Paulo: IMAM, 2005.

[3] BANZATO, Eduardo. **Warehouse Management System WMS: Sistema de gerenciamento de armazém**. São Paulo: IMAM, 1998.

[4] BIAGIO, Luiz Arnaldo. **Como administrar a produção:** + curso on-line – Barueri, SP: Manole, 2015.

[5] CORRÊA, Henrique Luiz. **Gestão de redes de suprimento: Integrando cadeias de suprimento no mundo globalizado**- São Paulo: Atlas, 2010.

[6] DENNIS, Pascal. **Produção Lean Simplificada**: Um guia para entender o Sistema de produção mais poderoso do mundo – Porto Alegre: Bookman, 2008.

[7] FACHIN, Odília. **Fundamentos de Metodologia**. 5 ed.São Paulo: Saraiva, 2013.

[8] GORDON, Steven R. **Sistemas de informação: uma abordagem gerencial**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

[9] GONÇALVES, Paulo Sérgio **Logística e cadeia de suprimentos**: o essencial. -- Barueri, SP : Manole, 2013.

[10] GORDON, Steven R. **Sistemas de informação: uma abordagem gerencial**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

[11] Honeywell, **Equipamentos de coleta**. Disponível em: < https://www.honeywellaidc.com/ptBR/products/computerdevices/handheld/ck75>. Acesso em: 15/02/2019.

[12] Honeywell, **Equipamentos para impressão**. Disponível em: < https://www.honeywellaidc.com/pt-BR/products/printers/industrial/pm43-pm23>. Acesso em: 15/02/2019.

[13] MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria.**Técnicas de pesquisa**: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisa, análise e interpretação de dados.7 ed. São Paulo: Atlas, 2012.

[14] MOURA, Reinaldo. **Separação de pedidos**. São Paulo: IMAM, 2003.

[15] POZO, Hamilton. **Administração de recursos materiais e patrimoniais**: uma abordagem logística – 7. ed. – São Paulo : Atlas, 2015.

[16] SIQUEIRA, Marli Aparecida da Silva. **Monografia e Teses**: das normas técnicas ao projeto de

pesquisa. 2 ed. Brasília: Consulex, 2013.

[17] SILVA, Paula Susana Cardoso Pereira. **Milk Run – redesenho das linhas de abastecimento realizado na BOSCH Termotecnologia SA**.- Relatório de Projeto Final 2007/2008 – Universidade do porto.

[18] SPIM, Adilson Aparecido. **Introdução à engenharia de produção**: conceitos e casos práticos. - Rio de Janeiro: LTC, 2016.

[19] STAIR, Ralph M. **Princípios de sistemas de informação**. São Paulo: 3 ed. Cengage Learning, 2013.

[20] TUBINO, Dalvio Ferrari. **Planejamento e controle da produção**: teoria e prática. 2. ed. – São Paulo: Atlas, 2009.

[21] VALENTE, Almir Mattar. **Gerenciamento de transporte e frotas** / — 3. ed. rev. – São Paulo: Cengage Learning, 2016

Capítulo 18

Estudo sobre o mapeamento de processos na melhoria do arranjo físico em uma microcervejaria

Bruna Grassetti Fonseca
Mariângela Catelani Souza
Luciana Nogueira
Nathan Gouveia Tamarozzi
Victor Luiz Lopes
William Moraes de Assis

Resumo: Para elaborar um projeto de arranjo físico também conhecido como *layout*, devemos encontrar um modelo que melhor organize máquinas, equipamentos e materiais envolvidos no processo produtivo a fim de melhorar a eficiência do processo e reduzir custos. Portanto, é necessário considerar aspectos relacionados à movimentação de materiais e pessoas, transporte, capacidade produtiva, estoque de matérias-primas e de produtos acabados e o espaço disponível. Para tanto, o mapeamento de processos é fundamental na identificação de processos e subprocessos, sabendo que eles são fundamentais para as empresas, pois é por meio deles que os resultados são alcançados, com o mapeamento, as organizações têm maior controle sobre seus processos, permitindo a implementação de melhorias e um gerenciamento mais efetivo focado nas metas. Essa pesquisa tem como objetivo mapear o processo de produção de uma microcervejaria e propor a implantação do melhor arranjo físico a fim de melhorar o desempenho operacional do processo de produção. Para realizar a pesquisa, foi feito um levantamento na literatura, sobre os conceitos de *layout*, mapeamento de processos e seus modelos de projeto. Foi proposto um modelo inicial de projeto de *layout* com base nas informações levantadas na literatura e com o mapeamento dos processos levantados na empresa estudada, para que possa haver uma análise e correção do *layout* com base na aplicação realizada e em seguida fazer uma última observação e finalização do modelo com base nessas aplicações.

Palavras-chave: arranjo físico, microcervejaria, mapeamento de processos.

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO E PROBLEMA

Ao realizar um projeto de arranjo físico também conhecido como layout, deve-se encontrar um modelo que melhor combine equipamentos, mão de obra,área de produção, área de armazenamento, produto, processo ou serviço, a fimde maximizar os fatores de produção (DE BORDA et. al. 2014).

Escolher o arranjo físico errado pode levar a problemas durante a operação, como padrões de fluxo longos ou confusos, operações inflexíveis, fluxos imprevisíveis e altos custos. Alterar o arranjo físico durante a operação é difícil e pode ser muito caro, portanto, ao projetar um arranjo físico, deve-se primeiro analisar o que se pretende ele forneça para a operação (SLACK et. al. 1997).

Sem um arranjo físico adequado, a ideia do tempo de produção ou tempode processo é quase ineficaz, pois gargalos de produção, excesso de mão de obra, recursos ociosos e desperdício de tempo são os principais geradores dasdespesas mais altas (FERNANDES et. al. 2013).

Souza (2014), relata que os processos são as bases nas quais todas as entidades produtoras criam riquezas. Pensando a respeito das empresas como sendo processos ao invés de funções, os administradores podem reduzi-los de maneira a criar mais valor por menos esforço, em vez de diminuir o tamanho dasfunções para simplesmente restringir custos. Isto irá ocorrer naturalmente na medida em que forem removidas dos processos as atividades sem valor adicionado, e estes aumentarem o seu nível de eficácia.

Partindo desse conceito, Souza (2014), ainda aborda que o mapeamentoé fundamental para uma organização, pois permite a compreensão contínua dosmercados externos e ajustes em todos os níveis da empresa diante das mudanças dos concorrentes e das expectativas dos clientes.

A falta de um mapeamento detalhado do processo dificulta a definição dosindicadores, pois há a falta de dados sobre as atividades e sobre os documentosde registro já existentes no processo (BIAZZI et. al. 2006).

1.2. PROCESSOS DE PRODUÇÃO

Processo pode ser qualquer atividade ou conjunto de atividades que toma um input, adiciona valor a ele e fornece um output a um cliente específico, ou seja, é um conjunto de atividades executadas em uma sequência lógica que temcomo objetivo produzir um bem ou serviço de valor para um grupo específico declientes. Os inputs podem ser materiais, equipamentos e outros bens tangíveis, mas também podem ser informações e conhecimento (GONÇALVES, 2000).

Processo envolve o uso dos recursos da organização para fornecer algo de valor. Sem o processo, os produtos não podem ser fabricados e os serviços não podem ser prestados. Da mesma forma, nenhum processo pode existir semque haja um produto ou serviço (SOUZA, 2014).

O processo de produção é um processo de negócio, como o de desenvolvimento de produtos, antes do início do projeto ele já é desenvolvido, quando os parceiros estratégicos estão envolvidos na definição da primeira especificação, ao definir o escopo de um projeto de desenvolvimento de produto(FORCELLINI et. al. 2006).

Passarini (2018), aborda que o gerenciamento do processo de produção inclui coordenar grupos de trabalho, delegar tarefas e funções aos funcionários,realizar análises de dados de produção e produtividade e também avaliar a capacidade dos processos de produção. Esse gerenciamento é feito com base em fatos e dados, como, pesquisa de mercado, desempenho de máquinas e decolaboradores.

Paladini (1995), relata que é necessário haver gestão da quantidade nos processos produtivos, pois ela visa eliminar qualquer defeito que possa aparecerdurante a produção, como também dar o direcionamento correto para todas as partes durante o processo visando o atendimento ao cliente.

1.3. MAPEAMENTO DE PROCESSOS

O gerenciamento de processos só se faz presente ao visualizarmos o processo. Para isso o mapeamento de processos é essencial ao identificar os processos e subprocessos sabendo que eles são fundamentais para as empresas porque é por meio deles que são alcançados os resultados. Com o mapeamento as organizações têm maior controle sobre os processos o que possibilita a implementação de melhorias e um gerenciamento mais efetivo focado nas metas (MELLO; SALGADO, 2005).

De acordo com Dreyfuss (1996), o mapeamento de processos é de extremaimportância para a condução de qualquer negócio, processo ou organização porque o processo gera um resultado que é o que o mantém no longo prazo, e para que o processo seja produtivo e eficiente.

A análise dos processos nas organizações resulta na identificação de diversas camadas do processo: fluxo (as medidas e os tempos), a sequência dasatividades a duração do ciclo, as esperas, dados, pessoas envolvidas, relaçõesde dependência entre clientes e fornecedores (GONÇALVES, 2000). Com a identificação desses itens é possível desenvolver medidores de desempenho que mostrem pontos chave do processo. Obtendo assim um controle mais detalhado que auxilia na tomada de decisão.

Sydle (2022), aborda três tipos de processos nas empresas, os processos primários, os processos de apoio ou suporte e os processos de gerenciamento. Para cada tipo de processo deve-se adotar uma abordagem de mapeamento visando mapear ele atualmente (AS IS), e usando os resultados para modelar uma proposta futura para o processo (TO BE).

Segundo Campos e Lima (2012), pode-se definir como os objetivos do mapeamento responsabilizar-se por:

- Melhoria dos processos, visando eliminar processos ineficientes, obsoletos e desnecessário;
- Documentação padronizada;
- Facilitar a visualização do processo;
- Possibilitar o conhecimento do processo por todos na equipe;
- Complemento total na documentação dos processos.

Ao aplicar o mapeamento de processos, Tseng, et.al. (1999), propõe quea apresentação do mapeamento seja feita empregando uma linguagem gráfica,expondo de forma precisa e detalhada as conexões do processo, desenvolvendo assim uma análise coerente e

adequada. Dentre todas as técnicas para o mapeamento de processos cabe ao responsável determinar qual o mais apropriado para o processo específico.

1.4. ARRANJO FÍSICO E FLUXO

Um bom projeto de arranjo de físico pode não só eliminar atividades que não agregam valor, mas também dar destaque para atividades que agregam, como minimização do custo de manuseio de materiais e movimentação interna,e promover a comunicação entre os participantes da operação. Quando adequado, o arranjo físico reduz tempos de ciclo dentro da operação, garantindofluxos mais linearizados e coerentes com a estratégia, facilita entrada, saída e movimentação dos fluxos de pessoas e de materiais e também facilita a manutenção dos recursos, o que garante fácil acesso a operação (CORRÊA e CORRÊA, 2012).

De acordo com Slack et. al. (1997), o arranjo físico de uma operação produtiva preocupa-se com a localização física dos recursos de transformação. Colocado de forma simples, definir o arranjo físico é definir onde colocar todas as instalações, máquinas, equipamentos e pessoal da produção. O arranjo físicoé uma das características mais evidentes de uma operação produtiva porque determina sua "forma" e aparência.

Corrêa e Corrêa (2012), também abordam que "a decisão do arranjo físico é uma parte importante da estratégia da operação. Um projeto bem elaborado de arranjo físico será capaz de refletir e alavancar desempenhos competitivos desejáveis".

1.5. MICROCERVEJARIAS

Em um estudo realizado pelo portal de notícias do Governo do Brasil (2021), através de uma pesquisa feita pelo Barth-Haas Group apontou o Brasil como o terceiro maior produtor de cerveja do mundo, depois da China e dos Estados Unidos. De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (2020), alcançou-se no país a marca de 1383 cervejarias registradas, o que representa um aumento de 14,4% em relação ao ano anterior, 2019.

Segundo a definição do art.36, do Decreto n°6871/09, a cerveja é a bebidaresultante da fermentação, a partir da levedura cervejeira, do mosto de cevada malteada ou extrato de malte, submetido previamente a um processo de cocçãoadicionado de lúpulo ou extrato de lúpulo (GOVERNO DO BRASIL, 2009).

Durante o século XIX, as cervejas britânicas possuíam grande influência comercial sobre o mercado, dominando o mercado brasileiro até a década de 1870. Porém, no final do século o governo tomou a ação de aumentar as taxas de importações, assim inviabilizando a importação favorecendo o surgimento decervejarias nacionais. Contudo, com o advento das guerras mundiais no século XX, a produção brasileira da bebida entra em declínio, pois parte das matérias- primas entraram em escassez, em especial o lúpulo. Já na década de 1980, várias microcervejarias são inauguradas no país, impulsionadas pelo reconhecimento da cultura cervejeira em todo o mundo, ampliando as possibilidades de estilos, logo, algumas chegando a se tornar indústrias (MORADO, 2009).

A diferença entre as microcervejarias e cervejarias, estão na sua capacidade produtiva mensal, onde, o produtor que tem sua capacidade de até duzentos mil litros se designa como microcervejaria e o que vai além, cervejaria.Porventura, as classificadas como micro visam além dos lucros, obter umresultado de alta qualificação gastronômica, procurando

atender nichos demercado premium e apreciadores da bebida (SEBRAE, 2022).

Em uma publicação da Associação Brasileira de Supermercados (ABRAS) (2012), foi concluído que as microcervejarias artesanais possuem um produto de qualidade superior, produzido com matéria-prima de alta qualidade ecuidados especiais desde a inicialização do processo até a finalização doproduto, diferente das grandes cervejarias dominantes do mercado, que possuem produtos constituídos de adjuntos não malteados, termo utilizado no âmbito cervejeiro.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Mapear o processo de produção de uma microcervejaria e propor a implantação do melhor arranjo físico e fluxo a fim de melhorar o desempenho operacional do processo de produção.

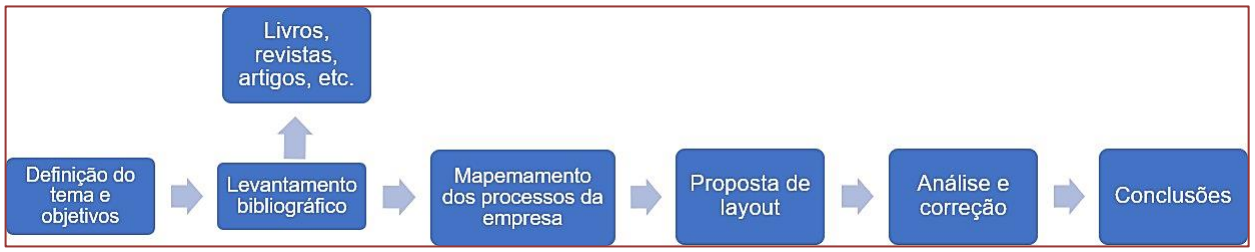
3. METODOLOGIA

A metodologia que será utilizada nesse estudo será a de pesquisa exploratória, que de acordo com Severino (2017) "busca apenas levantar informações sobre um determinado objeto, delimitando assim um campo de trabalho, mapeando as condições de manifestação desse objeto", já que visa fazer um estudo de caso do problema e de pesquisa qualitativa que para Gonsalves (2003), é capaz de compreender e explicar o fenômeno, o que impõe uma abordagem hermenêutica ao pesquisador diante do que os outros significam para sua prática.

Para a realização da pesquisa, foi feito um levantamento na literatura, emsite oficiais, revistas on-line e livros, sobre os conceitos de arranjo físico,mapeamento de processos e seus modelos de projeto.

Será proposto um modelo inicial de projeto de arranjo físico com base nas informações levantadas na literatura e com o mapeamento dos processos levantados na empresa estudada, haja uma análise e correção do arranjo com base na aplicação realizada e em seguida fazer uma última observação e finalização do modelo com base nessas aplicações.

Figura 1: Fluxograma das etapas da pesquisa

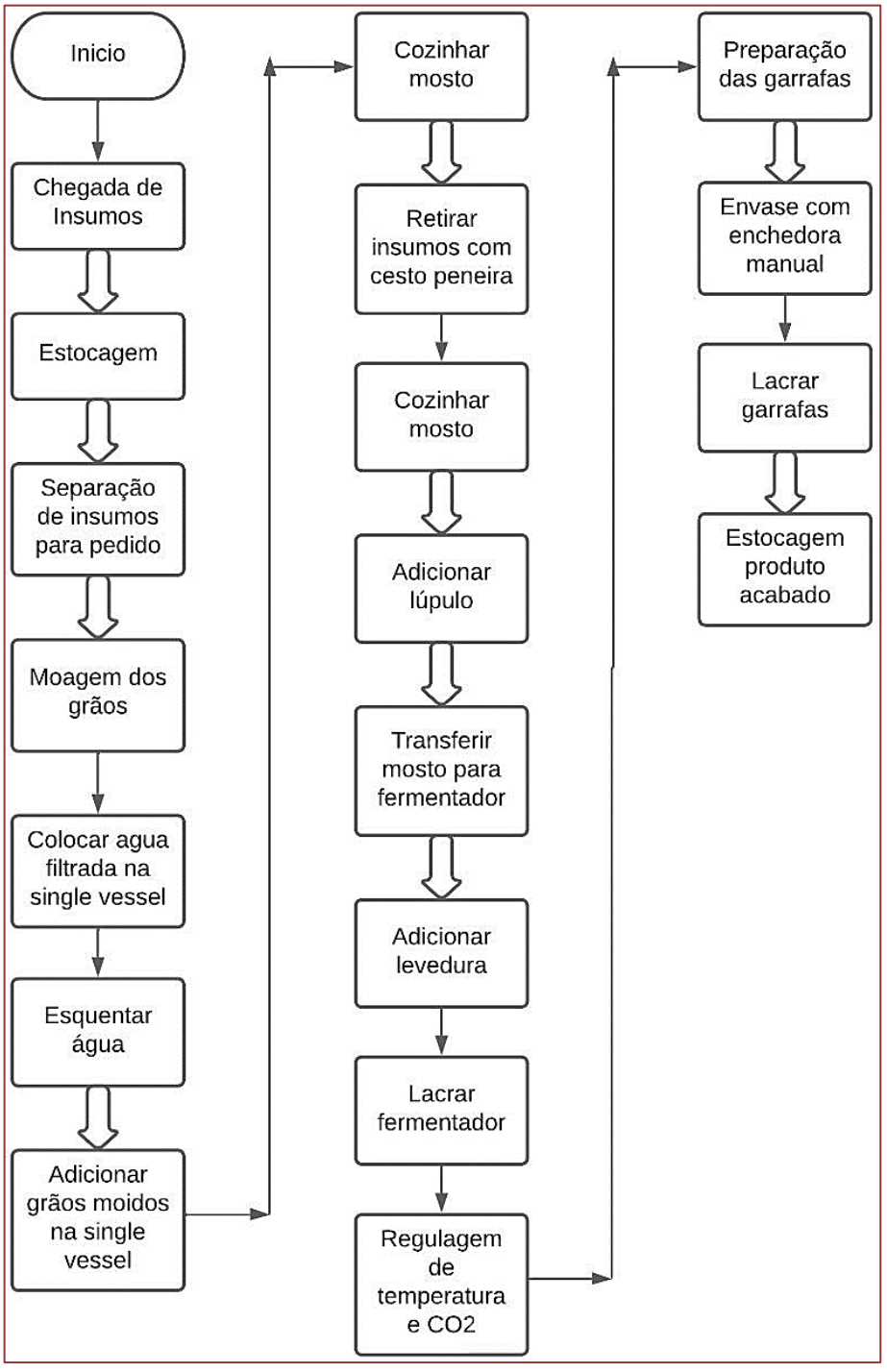


Fonte: Elaborado pelo autor.

4. DESCRIÇÃO DO CASO

Para o estudo foi solicitada uma visita onde a empresa apresentou os seus processos e o layout utilizado.

Figura 2: Fluxograma processo produtivo da empresa



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1. MAPEAMENTOS DOS PROCESSOS

Para produção da cerveja é necessário água, malte, lúpulo, levedura e dependendo da receita, adjuntos como açúcar, popa de fruta e mel. Comexceção da água, estes insumos são adquiridos de empresas terceiras com certificado de qualidade e quando chegam à empresa são colocados em um localdeterminado em paletes de plástico com exceção das leveduras que são estocadas na geladeira.

Figura 3: Insumos em paletes

Fonte: Elaborado pelo autor.

A água vem do cavalete de abastecimento da rede pública e ao entrar nainstalação, passa por um processo de filtragem três estágios através de um filtrocomposto de polipropileno que trata a água com carvão em bloco e resinas mistas, com objetivo de retirar partículas de sujeiras, metais, cor e minerais da água, produzindo água deionizada, processo conhecido como osmose reversa, então ela é depositada em uma caixa da água de polietileno com paredes preparadas.

Figura 4: Filtro

Fonte: Elaborado pelo autor.

A empresa estudada fabrica três receitas sendo Pilsen, Trigo e IPA (ÍndiaPale Ale). O princípio do processo de produção é o mesmo para todas as receitas, modificando apenas os tipos dos insumos e tempos de preparo.

O processo se inicia com a moagem dos grãos malteados em um moinho de inox de três rolos o qual tem a capacidade de moer 3 a 4 quilogramas por minuto. O objetivo da moagem é que não fique nenhum grão inteiro.

Figura 5: Grão moído

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após é feito a preparação da água, onde ela é depositada no equipamento single vessel e através de duas resistências elétricas é fervida por uma média de 20 a 30 minutos. Em seguida é feito a medição do PH, onde o ideal é que esteja entre 5 e 6, caso não estiver, pode ser ajustado manualmente com ácidoláctico, que é um produto alimentício.

Figura 6: Single vessel com água

Fonte: Elaborado pelo autor.

A single vessel possui um controlador automático com as gravações dasreceitas, suas etapas de temperatura e tempo de mosturação.

Em seguida, os grãos são colocados em um cesto de inox dentro da singlevessel, onde se inicia o processo de mosturação. Cada receita possui sua relação litros água / quilograma malte.

Com a água e o malte preparados, as resistências são ativadas e através de um termômetro, o controlador identifica a temperatura do mosto, assim ele ativa e desativa as resistências quando necessário para não fugir do padrão da receita.

Para cada receita, existe uma rampa de temperatura na qual durante o processo a temperatura vai sendo ajustada de 2 a 4 vezes, pois, cada tipo de enzima presente no malte reage a uma temperatura específica, entretanto em todas as receitas o mosto não pode ultrapassar de 80º Celsius para não dissolvertaninos presentes na casca do malte e deixar a cerveja com gosto adstringente.

Neste processo, o mosto fica circulando na single vessel através de umabomba magnética e mangueira atóxica, onde ele é puxado de fora do cesto e jogado por cima dele em um equipamento chamado spargel o qual tem a finalidade de não modificar a acomodação dos grãos neste procedimento.

Figura 7: Spargel

Fonte: Elaborado pelo autor.

Terminado este processo, o cesto é levantado através de uma catraca manual mantendo apenas o mosto na single vessel livre dos grãos, onde ele temsua temperatura elevada e é adicionado o lúpulo, responsável pelo amargor da cerveja.

Seguido disto, o mosto é transferido da single vessel para os fermentadores por bomba magnética e, nesta transferência é resfriado por um equipamento chamado chiller que, através de divisões em placas inox inibe o contato dos líquidos, fazendo troca de calor do mosto quente com água gelada por meio de mangueiras atóxicas, o preparando para recebimento das levedurasdentro dos fermentadores.

Figura 8: Chiller

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9: Transferência do mosto

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim que os fermentadores recebem o mosto, são adicionadas as leveduras para iniciar o processo de fermentação, no qual, elas fazem a transformação dos açúcares fermentáveis, em álcool e gás carbônico (CO2). Após, a máquina é vedada pela tampa principal e ativada para controle da cerveja, cada receita varia a temperatura e tempo de fermentação. Nesta etapao líquido não deverá entrar em contato com o ar para evitar a oxigenação.

A empresa possui três fermentadores que são refrigerados, possui controlador de temperatura, manômetro para controle do CO2, regulagem por válvula e duas torneiras de saída. Dois, são compostos em inox 304 e um em polipropileno. A diferença se encontra na carbonatação, onde o fermentador de polipropileno não suporta a gaseificação, sendo necessário durante o processo expulsar o CO2 mantendo apenas a produção de álcool e após, transferir a cerveja para um dos fermentadores de inox e injetar CO2 manualmente com um cilindro.

Figura 10: Fermentador inox

Fonte: Elaborado pelo autor.

As receitas passam então por uma rampa negativa de temperatura dentro dos fermentadores chegando até 0° Celsius, quando estão prontas para serem envasadas. A empresa utiliza garrafas de vidro 600 ml com tampa de metal e barril de chopp de metal. As garrafas são envasadas contra pressão, um procedimento onde o recipiente é preenchido com CO2 em uma máquina manualdenominada como enchedora e lentamente é feita a troca do gás por cerveja, assim evitando gerar espuma e consequentemente perca de carbonatação durante o procedimento, os barris de chopp depois de limpos e sanitizados, sãoenvasados através de uma válvula conectada em seu topo, onde ele é posicionado em cima de uma balança e de acordo com o peso é possível identificar o quanto de cerveja foi colocado em seu interior, com proporção aproximada de um quilograma para um litro.

Figura 11: Enchedora com cilindro CO_2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Seguido disso, os produtos são estocados dentro de uma câmara fria, pois não são pasteurizados e estão prontos para distribuição.

4.2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Através do mapeamento desenvolvido, foi identificado perdas no processo que podem ser melhoradas através de investimentos.

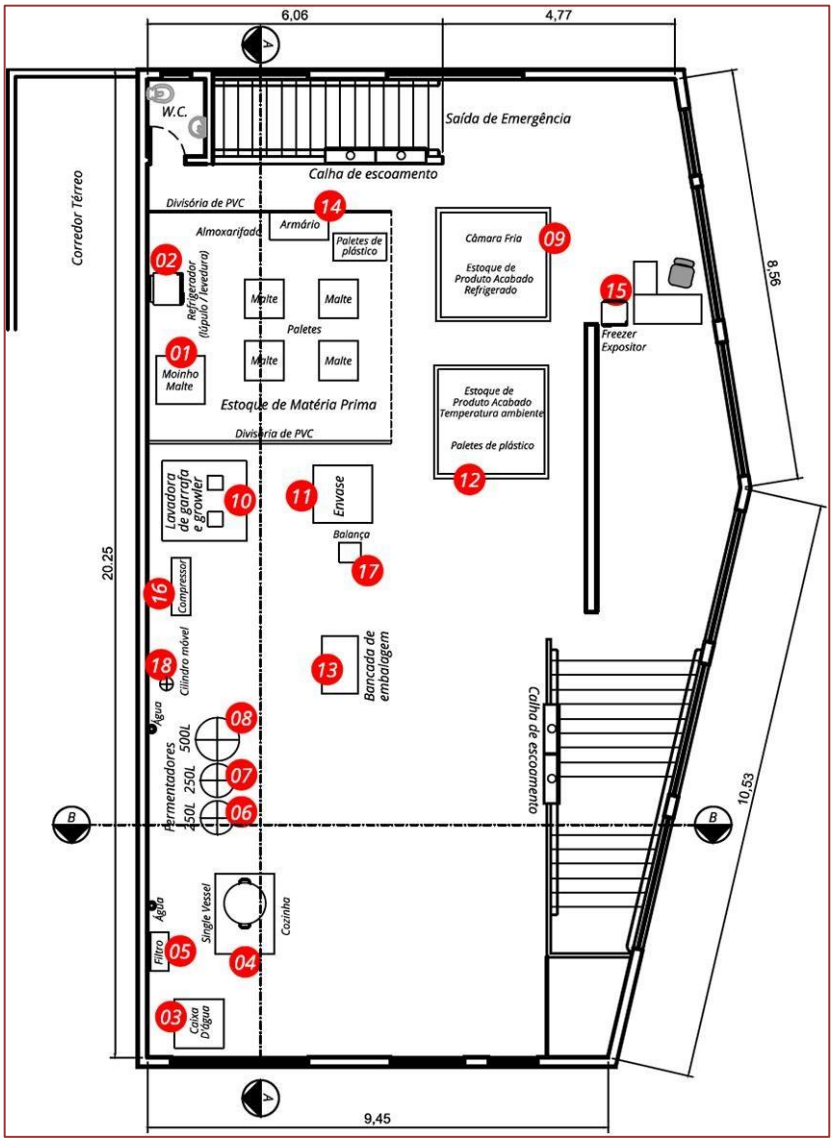
Neste estudo, notou-se que no processo de mosturação encontram-se três etapas desenvolvidas no mesmo equipamento single vessel, sendo a primeira etapa a fervura da água, a segunda etapa a adição dos grãos (incluindoas rampas de temperatura e remoção dos grãos) e a terceira etapa a fervura domosto com lúpulo.

Ainda no single vessel, o cesto do equipamento está com pouco vasão, diminuindo a recirculação do mosto gerando mais tempo de trabalho na segundaetapa, ele possui volume de cento e vinte litros e possui furação apenas no fundo enquanto a panela possui um volume de duzentos e cinquenta litros.

Também foi identificada uma perda de processo no equipamento fermentador polipropileno, devido a sua composição, ele não suporta a carbonatação da cerveja produzida, então se em uma receita é necessário dozedias de fermentação, durante todo o processo o gás é expulso através de uma válvula, sendo necessário transportar toda a cerveja para um dos fermentadoresinox que a empresa possui, conectar um cilindro CO2 no equipamento e ir injetando gás para que a cerveja absorva, processo que demora aproximadamente quatro dias.

De acordo com o layout apresentado na visita, notou-se que foi instalado o tipo de layout linear, com as máquinas e equipamentos colocados na ordem do processo produtivo, porém, com ajustes a serem melhorados.

Figura 12: Layout atual da microcervejaria



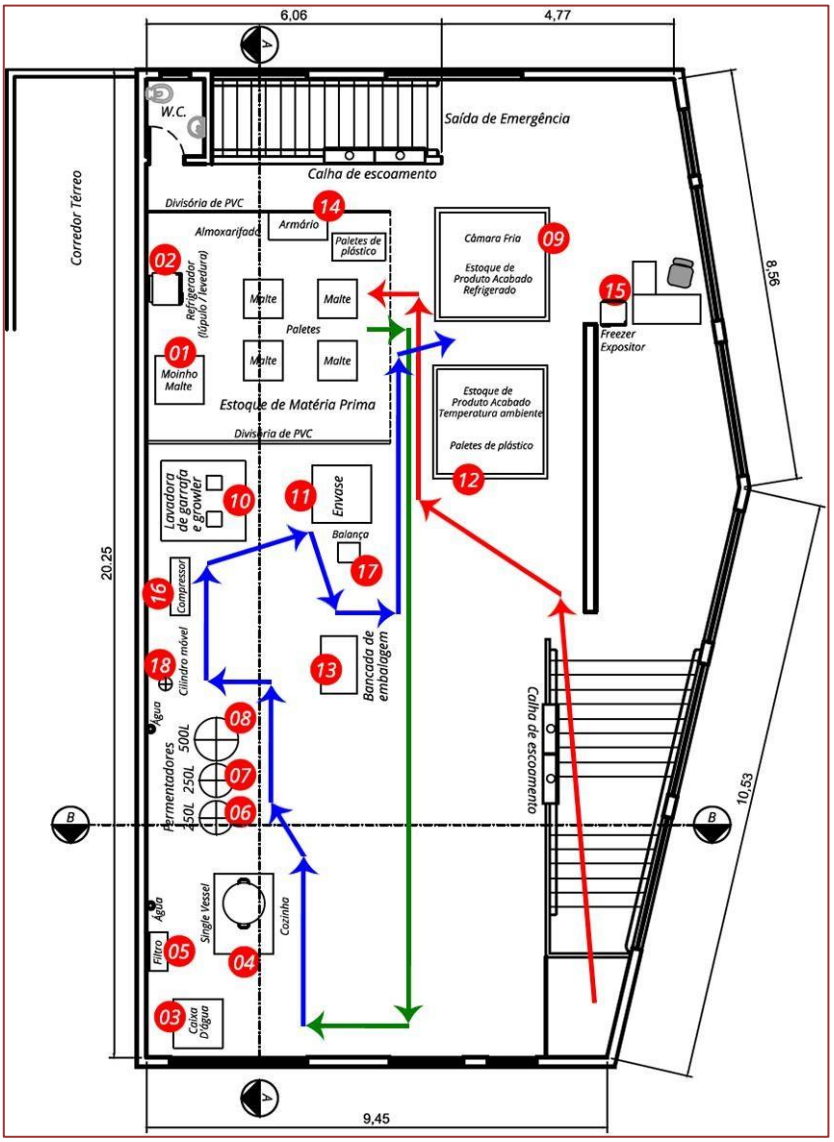
Fonte: (LOPES CERVEJARIA, 2022).

Durante a visita, o diretor da empresa relatou que o arranjo físico foi modulado sem o planejamento correto e que durante a montagem da empresa, não foi feito um mapeamento de processos.

Após a análise do layout, notou-se que o almoxarifado ficou localizado nofinal do processo, fora de contexto, posição que está gerando perda de tempo emão de obra, onde para iniciar o processo, é necessário transportar todo insumoque será utilizado no lote de um lado para o outro da empresa, e, quando há recebimento de insumos, é necessário atravessar o fluxo produtivo, entre envasee estocagem para chegar ao almoxarifado.

Nota-se o problema na figura abaixo, sendo o fluxo inicial dos insumos identificado pelas setas vermelhas, o transporte interno dos insumos pelas setasverdes e o fluxo produtivo pelas setas azuis.

Figura 13: Layout atual da microcervejaria com identificação do problema



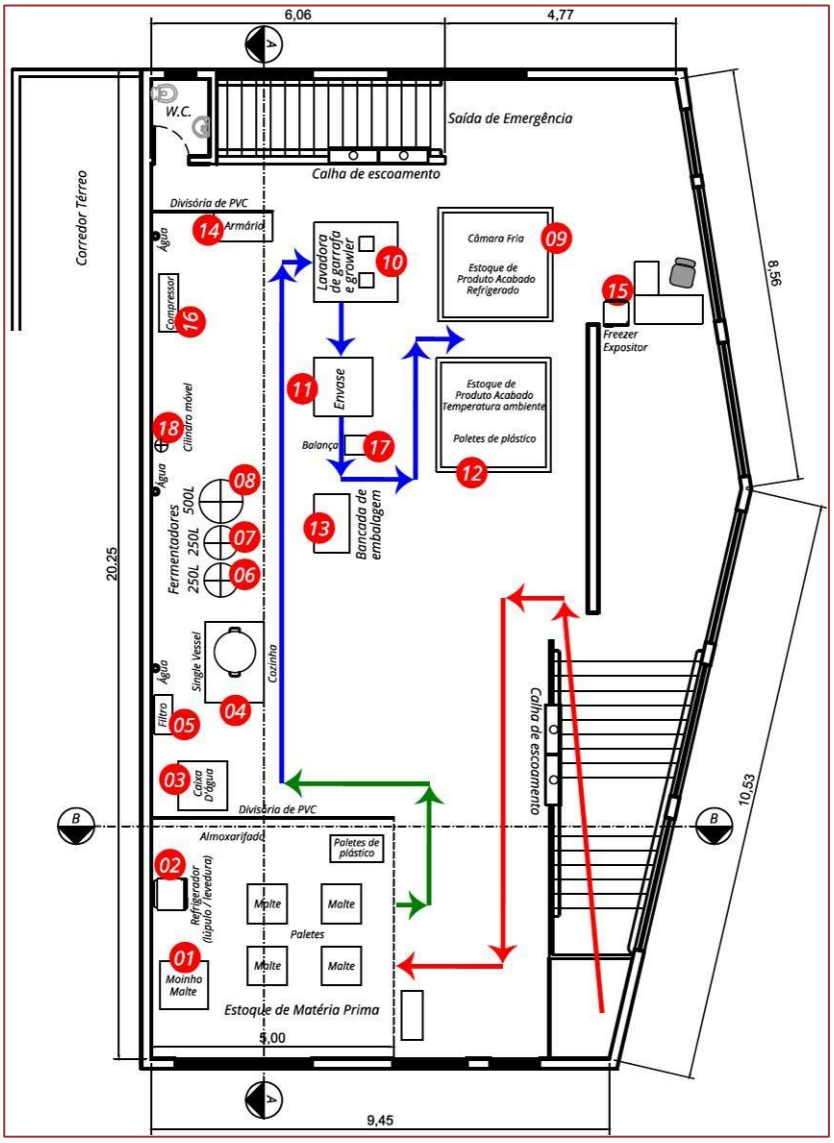
Fonte: Elaborado pelo autor.

5. PROPOSTAS DE MELHORIA

5.1. DE ARRANJO FÍSICO

Foi desenvolvida uma proposta de layout com o objetivo de melhoria paradesempenho da empresa, mantendo o princípio do layout linear e modificando a posição em que se encontra o almoxarifado, trazendo-o para o início do processo, sanando os problemas de distância, movimentação e interferência dofluxo. É identificado o fluxo inicial dos insumos pelas setas vermelhas, o transporte interno dos insumos pelas setas verdes e o fluxo produtivo pelas setas azuis.

Figura 14: Proposta de layout para microcervejaria



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se na figura acima a proposta do layout com identificação do fluxo produtivo por setas, sanando os problemas citados.

5.2. DE PROCESSOS

Através do mapeamento de processos, foi sugerida a substituição do maquinário single vessel por uma cozinha tri-bloco, enquanto na single vessel énecessário fazer uma etapa por vez para produção de cada receita, na tri-blocoé possível realizar as três etapas ao mesmo tempo, tornando possível produzir receitas continuas ou mais que uma receita no mesmo tempo de trabalho, em tese, a primeira panela está sempre fervendo água, a segunda realizando rampas de temperatura e a terceira fervendo o mosto com lúpulo, o tornando pronto para resfriar e ser transferido para os fermentadores, feito isso, o mosto da segunda panela é passado para terceira e a água da primeira panela é passada para

segunda, disponibilizando a primeira para encher de água novamente e iniciar outra fervura.

Com a single vessel atual a empresa tem capacidade de produzir duas receitas no dia sendo aproximadamente quatro horas cada. Com a melhoria do equipamento para tri-bloco, a receita inicial consome três horas e meia eposteriormente as próximas uma hora cada, tornando possível produzir seis ou sete receitas no dia.

Figura 15: Modelo de equipamento tri-bloco

Fonte: Mercado Livre (2022).

Foi sugerido também caso a empresa não efetivar a melhoria citada acima, somente a troca do cesto de cento e vinte litros por outro de cento e oitenta litros, ressaltando além da furação apenas no fundo, furação parcial nasparedes laterais também. Com isso se obteria um ganho de 25% no tempo da segunda etapa da mosturação.

Também foi proposta a substituição do fermentador de polipropileno por mais um fermentador de aço inox, com esta melhoria, se obtém o benefício da conclusão do processo de fermentação por completo, evitando a etapa adicional de carbonatação manual, tendo um ganho aproximado de quatro dias no processo de qualquer receita feita neste fermentador.

6. CONCLUSÃO

Esse estudo buscou apresentar uma proposta de modelo de layout para uma microcervejaria. Através do estudo notou-se que fazer um mapeamento deprocessos eficiente é de muita importância, pois torna os problemas visíveis e permite escolher o melhor layout.

Das propostas apresentadas pelo estudo, a empresa aderiu à mudança de seu layout o corrigindo para o modelo linear, que através do estudo mostrouser bastante eficiente, pois mantém o fluxo de todos os processos livres de interrupções, contínuos, obtendo o melhor desempenho de trabalho e evitando percas no tempo.

Não foi necessário investimento financeiro para mudança, apenas mão deobra para mover as máquinas e equipamentos, alteração da posição dos pontosde água na parede através de encanamentos externos que a empresa já possuíae não foi necessário fazer alterações na instalação elétrica. Do início até a finalização deste trabalho levou o período de uma semana.

Entre as outras melhorias apresentadas pelo estudo, a empresa indeferiupor condições financeiras, esclarecendo que é uma empresa nova no mercado e não possui capital para as mudanças de imediato, tendo que continuartrabalhando da forma que está hoje.

Com o estudo e as ferramentas que foram utilizadas, a empresa obteve ciência das percas atuais e os benefícios que terá fazendo os investimentos apresentados, colocando em desenvolvimento um planejamento estratégico de crescimento em longo prazo, visando todo projeto de melhoria elaborado pelo grupo e de acordo com o giro de capital, ira efetivar todas as mudançasgradativamente, pois as melhorias são trabalhadas em percas que precisam ser sanadas.

Concluiu-se que foi de suma importância realizar a análise de layout e o mapeamento de processos, uma vez que se não fosse feito, não seria possível notar as percas de tempo, mão de obra e processo, trazendo um prejuízo gradativo e imperceptível ao longo do tempo que nunca seria sanado. Para a empresa, se tornou uma ferramenta de estudo que ela procurou adotar para suacultura e que irá exercer periodicamente, pois busca estar em constante mudança e evolução da melhor forma possível.

REFERÊNCIAS

[1] ABRAS. **Cervejaria artesanal avança 84%.** Disponível em: <https://www.abras.com.br/clipping/bebidas/29454/cervejaria-artesanal-avanca- 84>. Acesso em: 05/05/2022.

[2] AZEVEDO, Irene C. G. Fluxograma como ferramenta de mapeamento de processo no controle de qualidade de uma indústria de confecção. In**: Congresso Nacional de Excelência em Gestão**. 2016. p. 1-14.

[3] BAGATINI, Gabriella S. Aplicação de Mapeamento de Processos em uma Empresa de Pequeno Porte: um Estudo de Caso Visando Melhoria Contínua no Sistema de Gestão da Qualidade. **VIII Workshop De Pós-Graduação E Pesquisa Do Centro Paula Souza**. São Paulo, 2013.

[4] BIAZZI, M. R.; MUSCAT, ARN; BIAZZI, JL de. Indicadores de Desempenho associados a Mapeamento de Processos–Estudo de Caso em Instituição Pública Brasileira. [ANAIS] **XXVI ENEGEP 2006**. Fortaleza/CE, p. 7, 2006.

[5] CAMPOS, Renata A., LIMA, Sandra M. P. **Mapeamento de Processos: Importância para as Organizações.** UFFRJ, 2012. Disponível em: < http://www.ufrrj.br/codep/materialcursos/projetomapeamento/MapeamentoProce ssos.pdf>. Acesso em: 23/05/2022.

[6] CHANGQING, G., KEZHENG, H., FEI, M.: Comparison of innovation methodologies and **TRIZ. The TRIZ Journal, Issue (September 2005),** 2005.

[7] CORRËA, Henrique L., CORRËA Carlos A. **Administração de produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica.** 1.ed. – 5. Reimpr. - São Paulo: Atlas, 2012.

[8] DE BORBA, Mirna; LUNA, Mônica Maria Mendes; DA SILVA, Fernanda Antunes Batista. Proposta de arranjo físico para microempresa baseado no planejamento sistemático de layout (SLP). **Revista Eletrônica Produção & Engenharia**, v. 6, n. 1, p. 519-531, 2014.

[9] DREYFUSS, Cassio. **As redes e a gestão das organizações**. Rio de Janeiro: Guide, 1996.

[10] FERNANDES, Giovani; STRAPAZZON, Rafael; CARVALHO, Andriele De Pra. Layout de empresas e

seus benefícios. IIIXXX ENEGEP, Salvador. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador, BA, Brasil,** 2013.

[11] FERNANDES, Marcelo. M.. **Análise de processo de seleção de projetos seis sigma em empresas de manufatura no Brasil**. Dissertação Mestrado em Engenharia de Produção, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de produção, Itajubá, MG, UNIFEI, 2006.

[12] FORCELLINI, Fernando A. et al. **Gestão de desenvolvimento de produtos**: uma referência para a melhoria do processo. São Paulo: Saraiva, v. 30, 2006.

[13] GONÇALVES, José Ernesto Lima. Processo, que processo?. **Revista de administração de empresas**, v. 40, n. 4, p. 8-19, 2000.

[14] GONSALVES, E. P. **Iniciação à pesquisa científica**. 3. ed.Campinas: Alínea, 2003.

[15] GOVERNO DO BRASIL. **Instrução Normativa Nº65, de 10 de dezembro de 2019**. Disponível em: < https://www.in.gov.br/web/dou/-/instrucao-normativa-n- 65-de-10-de-dezembro-de-2019-232666262>. Acesso em: 05/05/2022.

[16] MAPA. **Anuário da Cerveja 2020**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/com-crescimento-de-14- 4-em-2020-numero-de-cervejarias-registradas-no-brasil-passa-de-1-3- mil/anuariocerveja2.pdf>. Acesso em: 04/05/2022.

[17] MARTINS, Petronio Garcia; LAUGENI, Fernando Piero. **Administração da produção**. 1. ed. São Paulo, SP: Saraiva, 1998.

[18] MERCADO LIVRE. **Cozinha Ou Sala De Brassagem 75 L/b Tribloco Cerveja Artesã**. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1552216622- cozinha-ou-sala-de-brassagem-75-lb-tribloco-cerveja-artes-_JM#position=2&search_layout=stack&type=item&tracking_id=85f72f47-a76f-41cd-a289-c4d8a99241ee>. Acesso em: 25/06/22.

[19] MORADO, Ronaldo. **Larousse da Cerveja**. 1ª Edição. São Paulo: Alaúde, 2017.

[20] NASCIMENTO, Fabrício Alves. Mapeamento de processos em uma empresa de equipamentos e serviços offshore. **Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha**, 2019.

[21] PASSARINI, Giuseppe Ricardo. **Gerenciamento de processos produtivos através de abordagem sistêmica**. SENAI-SP Editora, 2018.

[22] QUINN, James Brian. Intelligent enterprises. **New York: Free Press**, 1992. vol. 6, no. 4 pp. 48-63.

[23] RAMOS, Davidson. **O que é e como usar o Diagrama de Tartaruga**. Blog da Qualidade, 2017. Disponível em: <https://blogdaqualidade.com.br/o-que-e-e- como-usar-o-diagrama-de-tartaruga/>

[24] SEBRAE. **Como montar uma microcervejaria**. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/ideias/como-montar-uma-microcervejaria,8f387a51b9105410VgnVCM1000003b74010aRCRD#apresenta cao-de-negocio>. Acesso em: 04/05/2022.

[25] SEVERINO, Antônio Joaquim. **Metodologia do trabalho científico**. Cortez editora, 2017.

[26] SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da Produção**. 3. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2009.

[27] SOUZA, Daniele Goncalves de. **Metodologia de mapeamento para gestão de processos**. 2014.

[28] SYDLE. **Como fazer mapeamento de processos AS IS, TO BE e TO DO?.** Disponível em:<https://www.sydle.com/br/blog/mapeamento-as-is-to-be- 5eece7bcf36a6f664f705834/>. Acesso em: 10/05/2022

[29] TAYLOR, Frederick W. **Princípios de Administração Científica**. Nova Iorque: Harper & Row, 1911.

[30] TSENG, M. M.; QINHAI, M.; SU, C. J. Mapping Customers' Service Experience for Operations Improvement. **Business Process Management Journal**, v. 5, n. 1, p.50-64, 1999.

[31] WHITE, Stephen A. Introduction to BPMN. **IBM Corporation**, July 2004.

Autores

AUTORES

ALINE MARA OLIVEIRA (ORGANIZADORA)

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2012). Pós Graduada em Gestão de Projetos (FGV 2014-5015). Ministrou aulas no Centro Universitário do Planalto de Araxá(2015-2016) e no CEFET-MG nos cursos de graduação e técnicos. Tem experiência na área de Automação Industrial, Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: redes industriais, proteção de sistemas elétricos, IEC-61850, automação, instrumentação, sistemas de controle, equacionamento de controladores, sistemas multivariáveis e teoria de controle. Trabalhou na indústria no setor de projetos industrias no período de 2007 a 2015. Mestre pela Universidade Federal de Uberlândia. (2017-2019). Atualmente doutoranda no curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.(2019-2023)

OSVALDO SENA GUIMARÃES (ORGANIZADOR)

Graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Kennedy (1983), Ênfase em Engenharia de Transportes EEK (1983), Análise De Sistemas - UFMG(1985), Especialização em Gestão de Projetos de Engenharia IEC/PUC (2012), Mestrado em Estratégia FEAD (2005). Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Minas Gerais (2015-2017 Divinópolis). Professor na Faculdade Senac Minas. Atua na área de ensino superior desde 1988 como Professor, Coordenador de Curso, Coordenador de Extensão, Coordenador de Iniciação Científica e de Pré-incubadora de base Tecnológica. Atua na área de Engenharia, Computação e Projetos desde 1984.

ACELIA PATRÍCIA BUBOLTZ DA SILVA SANTOS

Estudante do curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia - UERGS em Santa Cruz do Sul

AMANDA SAHORY NUNES SERAFIM

Formada em Engenharia Elétrica pela UFERSA.

AMIR MATTAR VALENTE, DR.

Pesquisador de Desenvolvimento Tecnológico, nível 2 do CNPq. Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina (1979), mestrado em Engenharia de Transportes pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1983) e doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina (1994). Atua como Engenheiro de Transportes junto ao LabTrans para projetos que atendem a ANTT, o Ministério dos Transportes, o DNIT, a ANTAQ, a SNP/MInfra e a SAC/MInfra. Como pesquisador, é autor de dois livros, diversos artigos e trabalhos científicos, possui cinco registros de patentes junto ao INPI e é membro do corpo técnico da Revista da ANTT, membro do corpo editorial da Revista Gestão Industrial (online) e da Revista Brasileira de Transportes (FGV), atua como revisor nos periódicos Revista Transporte Y Territorio, Revista Transportes, Revista Brasileira de Gestão Urbana e TRB - Transportation Research Board, nas áreas de Engenharia de Transportes e Logística.

ANA CAROLINA DIAS BRITO

Graduanda em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Brasil. Participa ativamente do Grupo de Inovação e Pesquisa em Automação e Robótica (GIPAR). Participa de iniciação científica sobre identificações corporais por meio da percepção robocentrica. Atuou no setor de energias renováveis, principalmente energia solar fotovoltaica. Possui interesse de pesquisa na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Energias Renováveis, Geração Distribuída, e Automação.

ANA PAULA LUCCA RIBEIRO

Estudante do curso de Engenharia Química | UFPR.

AUTORES

ANDERSON DE OLIVEIRA CASTRO CORREIA

Graduando em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Brasil, com participação ativa no grupo de pesquisa e competição em robótica (RAS). Contribuo como voluntário no projeto de Dimensionamento de uma Turbina Eólica de Eixo Vertical Tipo H de Pequeno Porte. Tenho um interesse profundo em pesquisas e atividades profissionais na área de eletrotécnica, com foco específico em instalações residenciais e industriais.

ANNA MARIA DE MEDEIROS GOMES OLIVEIRA

Graduanda de Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Brasil. Participa ativamente como bolsista do Programa de Educação Tutorial (PET Engenharias), desde 2022. Atua como Webdesigner no capítulo WIE-IEEE, desde 2022. Possui interesse de pesquisa na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em áreas que envolvam sistemas elétricos de potência e instalações elétricas.

BRUNA GRASSETTI FONSECA

Doutora em Engenharia e Ciência de Alimentos pela Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho - Unesp (2023), mestre em Engenharia de Produção pela Universidade de Araraquara - UNIARA (2016), especialista em Segurança e Controle de Qualidade dos Alimentos pela Faculdade de Medicina de São José do Rio Preto - FAMERP (2012) e graduada em Engenharia de Alimentos pelo Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos - UNIFEB (2008). Docente nos cursos de graduação em Administração, Ciências Contábeis, Engenharia de Produção, Engenharia Civil, Engenharia da Computação, Engenharia Elétrica, Tecnólogo em Gestão Financeira, Tecnólogo em Marketing, Tecnólogo em Recursos Humanos e Tecnólogo em Logística, e também, nos cursos de pós graduação em Controladoria, Logística e Finanças, Gestão de Negócios e Marketing Estratégico e Gestão Estratégica de Pessoas. Bem como, experiência industrial na área de legislação e rotulagem de produtos alimentícios, e garantia e controle de qualidade de processos de produção.

BRUNA SULZBACHER FISCHER

Estudante do curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia - UERGS em Santa Cruz do Sul

BRUNO MOURA DOS SANTOS MIRANDA

Graduando em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Brasil. Membro voluntário do capítulo WIE-IEEE. Participa ativamente como bolsista do Programa de Educação Tutorial (PET-Engenharias). Possui interesse de pesquisa na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em áreas que envolvam Sistemas Elétricos de Potência e Instalações Elétricas.

CATHARINE VENTURINELI DOS SANTOS

Egressa do curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia - UERGS em Santa Cruz do Sul

CLÁUDIO JÚNIOR NEVES SOUSA

Graduando em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Brasil. Atua como técnico em eletrônica fazendo manutenção em aparelhos eletrônicos. Atua como voluntário no projeto Dimensionamento de uma Turbina Eólica de Eixo Vertical Tipo H de Pequeno Porte. Atuou como assistente no setor de projetos na empresa júnior de engenharia elétrica(EJEEL). Possui interesse em pesquisar e trabalhar na área de eletrotécnica focando na parte de instalações fotovoltaicas e automação residencial e industrial.

AUTORES

CLEITON BITTENCOURT DA PORCIÚNCULA

Engenheiro Químico pela Universidade Federal do Rio Grande (FURG, 2005). Doutor em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2013), com ênfase na produção de hidrogênio via corrosão alcalina do alumínio para uso em células de combustível. Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2007) na área de simulação fluidodinâmica computacional (CFD) aplicada a processos de separação por membranas. Desenvolveu pesquisas na área de gaseificação e incineração de resíduos de biomassa e filtração a seco de particulados. Principais objetivos: docência, pesquisa científica e desenvolvimento tecnológico na área de Energia, com especial interesse em células de combustível e/ou geração de hidrogênio. Realizou Pós-doutorado em Engenharia Química (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) com ferramentas de matemática aplicada e programação computacional para estudo da redução de mecanismos cinéticos para combustão de chamas de biodiesel no período de abril/2013 a março/2014 (incompleto). Atualmente é Professor Adjunto (Dedicação Exclusiva) na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS), Unidade em Santa Cruz do Sul, curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia. Foi Coordenador do Curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia de maio de 2016 até maio de 2018. Também é membro do NDE (Núcleo Docente Estruturante) do curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia desde setembro de 2016. Fez parte do Consun (Conselho Superior Universitário) no período de 2018 a 2020

EDSON COSTA OLIVEIRA

Graduando em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Brasil. Participa ativamente como bolsista do Programa de Educação Tutorial (PET-Engenharias) desde 2020. Atuei como Monitor das disciplinas Física III, Álgebra Vetorial e Geometria Analítica (AVGA) e Cálculo II desde de 2020 a 2022. Possui interesse de pesquisa na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Aprendizado de Máquina, Eletrônica Digital e Processamento de Imagens.

ESTEFANI MARIA BARRETO MONTENEGRO

Graduanda em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Brasil. Participa ativamente como bolsista do Programa de Educação Tutorial (PET-Engenharias) desde 2020. Atuei como Vice-presidente do diretório acadêmico de engenharia elétrica (DAEE) desde 2012 a 2023. Atuei como Monitora da disciplina Álgebra Vetorial e Geometria Analítica (AVGA) desde de 2020 a 2022. Possui interesse de pesquisa na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em áreas que envolvam Sistemas Elétricos de Potência e Proteção de Equipamentos.

EUGÊNIO CAVALLAZZI

Consultor de empresas e coordenador técnico do Laboratório de Transportes e Logística da Universidade Federal de Santa Catarina. Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina (1979), mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE (1984), doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina na área de Pesquisa Operacional (2013). Completou estágio pós-doutoral na Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Civil no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial (2020). Possui MBA em Inteligência Organizacional e Gestão do Conhecimento pelo Centro de Referência em Inteligência Empresarial na Universidade Federal do Rio de Janeiro (2022). Possui especialização no exterior em Consultoria de Negócios pela instituição INSEAD na Inglaterra (1997) e Excelência em Tecnologia da Informação pela Universidade de Pensilvânia - EUA (1998). Trabalhou e ocupou diversos cargos no Grupo British American Tobacco (Souza Cruz) de 1982 a 2003. Ministrou cursos de graduação e pós-graduação em universidades, tais como a UFRJ / COPPE, Universidade Única / Sociesc, UnisulVirtual, Universidade Cândido Mendes e Escola Técnica Federal de Santa Catarina (atual IFSC).

AUTORES

EVANDRO SEGUNDO SOARES PEREIRA

Profissional com mais de 20 anos de consultoria na área de manufatura e logística. Formado em administração e pós-graduado em Gestão de operações logísticas na UNIVILLE, MBA em gestão de projetos na USP e Mestrando em engenharia mecânica na UNICAMP.

EVERTON RUGGERI SILVA ARAÚJO

Possui mestrado em engenharia mecânica pela Universidade do Estado de Santa Catarina (2014) e graduação em engenharia de controle e automação pela Estácio (2011). Tem experiência na área de fabricação com ênfase na usinagem de materiais e processo de soldagem, na automação de sistemas mecânicos e simulação computacional através do método de elementos finitos (MEF) . Atua como consultor de automação de sistemas no âmbito industrial e realiza treinamentos corporativos com softwares computacionais na área de simulação. Atualmente é Conselheiro do CREA-PA, Coordenador dos cursos de engenharia mecânica, produção e elétrica da Universidade da Amazônia, professor das universidades da amazônia (UNAMA) e Universidade Federal do Pará (UFPA).

FABIANA DE CAMPOS FIORUCCI

Estudante do curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia - UERGS em Santa Cruz do Sul

FILIPE CARVALHO DE ANDRADE

Estudante de Engenharia Elétrica pelo IFBA, com experiência em ensino, pesquisa e extensão. Atualmente participa do PET Engenharias e atuou como monitor voluntário em diversas disciplinas. Participa de projetos de pesquisa no Grupo Interdisciplinar em Tecnologias Inovadoras (GITI) e no Grupo de Inovação e Pesquisa em Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade de Energia (GIPCEM). Além disso, atua como voluntário na coordenação administrativa do Diretório Acadêmico de Engenharia Elétrica. Atuou como assessor da Coordenadoria de Projetos do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Estado da Bahia - Júnior, e como tesoureiro no Capítulo Estudantil IEEE MTT-S IFBA VDC. Suas áreas de atuação incluem Fontes Renováveis de Energia, Telecomunicações, Sistemas Elétricos de Potência e Compatibilidade Eletromagnética.

GISELLE FRANCINE BRITO MUNIZ

Graduanda de Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Brasil, com experiência em atividades de ensino, pesquisa e extensão. Bolsista no Programa de Educação Tutorial - PET Engenharias. Membro do Grupo de Inovação e Pesquisa em Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade de Energia (GIPCEM). Integrante da diretoria do Grupo de Afinidade Woman in Engineering (WIE) IFBA. Experiência como monitora na disciplina de Análise de Sinais e Sistemas. Possui afinidade em áreas correlatas a Telecomunicações, Energias Renováveis e Sistemas Elétricos de Potência.

JANCLER ADRIANO PEREIRA NICÁCIO

Inspetor de equipamentos na refinaria Gabriel Passos da Petrobras (REGAP), inspetor de ensaios não destrutivos nas técnicas de líquidos penetrantes, partículas magnéticas e ultrassom pela ABENDI. Doutor e mestre em Engenharia Mecânica pela UFMG e Pucminas. Doutor e mestre em Engenharia de Materiais pelo CDTN/CNE e pelo CEFET-MG.

JONAS SOUZA PINTO

Graduando em Engenharia Elétrica nas ênfases de Eletrônica, Eletrotécnica, Automação e Controle. Ex-membro do grupo Grupo de Inovação e Pesquisa em Automação e Robótica (GIPAR). Ex membro Coordenação Administrativa do Diretório Acadêmico de Engenharia Elétrica – DAEE IFBA. Colunista voluntário do Portal da Inovação e Qualidade – InQ.Ifba. Pesquisador do Grupo Interdisciplinar em Tecnologias Inovadoras (GITI). Membro estudantil do Colegiado de Engenharia Elétrica IFBA-VCA.

AUTORES

Bolsista do grupo PET Engenharias IFBA-Vitória da Conquista. Tenho interesse nas áreas de eletrônica digital e programação.

JORNANDO PRADO DE OLIVEIRA SANTOS

Graduando em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Brasil. Atuou como assistente no setor de marketing na empresa júnior de engenharia elétrica(EJEEL). Atua como voluntário no projeto Dimensionamento de uma Turbina Eólica de Eixo Vertical Tipo H de Pequeno Porte. Possui interesse em pesquisar e trabalhar na área de eletrotécnica focando na parte de instalações residenciais e industriais.

JOSÉ VICTOR CARDOSO LACERDA

Graduando em Engenharia Eétrica pelo Instituo Federal de Educação, Ciência e Tecnoloia da Bahia (IFBA). Professor de pré-vestibular em Matemática e Ciências da Natureza desde 2019 e Projetista Elétrico na DBA Soluções em Engenharia, com foco em redes de distribuição de energia elétrica, comissionamento e adequação elétrica. Atualmente, atuo na elaboração de projetos executivos de usinas fotovoltaicas até 5MW, envolvendo simulações de malhas de aterramento e dimensionamento de condutores. Interessado em eletrotécnica para Engenharia Elétrica, com ênfase em geração distribuída e automação industrial.

JOSEANE OLIVEIRA DA SILVA

Possui graduação em Agronomia pela Universidade Federal da Bahia (2001), mestrado em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas) pela Universidade Federal de Viçosa (2003) e doutorado em Produção Vegetal pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (2007). Atualmente é professora titular do Instituto Federal da Bahia, campus Vitória da Conquista e Tutora do Programa de Educação Tutorial - PET Engenharias. Tem experiência na área de Ciências Agrárias, com ênfase em Ciência do Solo e Produção Vegetal. Atualmente é tutora do PET Engenharias.

KIARA BONELLA SCARAMUSSA

Estudante de engenharia elétrica pelo IFBA, com sólido envolvimento acadêmico em programas como Empresa Júnior, Diretório Acadêmico, PET e Portal INQ. Possuo experiência prática e teórica na área de Energia Solar, contribuindo para projetos relevantes durante a graduação. Demonstro habilidades de liderança, trabalho em equipe e iniciativa por meio de participações ativas em atividades extracurriculares. Além disso, possuo proficiência em inglês, atingindo um nível intermediário avançado.

LEANDRO MENDONÇA LALLI PERON

Mestre em Manufatura Avançada, Qualidade e Engenharia de Produto (Pós-graduação stricto sensu em Engenharia de Produção, MSc), Engenheiro de Gestão (registrado junto ao CONFEA CREA-SP desde 2021) e também Bacharel em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal do ABC (UFABC). Tecnólogo em Mecatrônica Industrial pela Faculdade de Tecnologia Termomecânica (CEFSA FTT). Cursou também parcialmente a titulação de Tecnólogo em Automação Industrial (FATEC-SBC), curso que interrompeu para dedicação às certificações internacionais como auditor. Possui diversos cursos complementares na área de Bussiness Development e Operational Excellence, com formação PMI IIBA e LSS Green Belt. É certificado como Auditor Interno Integrado SGI EHS (ISO 14001 e ISO 45001), Auditor AR ABIQUIM, Auditor Qualificado VDA 6.3, Auditor Líder ISO 9001:2015 e Auditor Líder IATF 16949:2016. Possui 10 anos de experiência proffisional em Sistemas de Gestão e Projetos, sobretudo no setor industrial automotivo, além de prestar serviços de consultoria pontuais a empresas nacionais. Possui sólido conhecimento em Ferramentas da Qualidade, Metodologias de Análise de Risco e Alinhamento Estrategico. Atua como representante de empresa multinacional no comitê internacional VDA AIAG, como especialista de FMEA. Reside nos EUA desde 2023, onde trabalha como Engenheiro de Manufatura Avançada em projeto global para industrialização em alta escala de veiculos eletricos (EV), desenvolvendo processos de manufatura e montagem de motores, eixos, powertrain e hibridos em geral.

AUTORES

LUCAS MACHADO CÂMARA

Estudante do curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia - UERGS em Santa Cruz do Sul

AUTORES

LUCIANA NOGUEIRA

Graduação em Administração de Empresas pela Fundação Educacional de Votuporanga (1996), mestrados em Comunicação pela Universidade Paulista (2006) e em Administração em Serviços pelo UNIBERO (2002). Atualmente é coordenador auxiliar e professor adjunto I da Universidade Paulista, Campus São Jose do Rio Preto. Tem experiência na área de Administração, atuando nos seguintes temas: Administração Mercadológica, Relacionamento com o Cliente, Processos e Estruturas Organizacionais, Administração Geral e Responsabilidade Social.

LUKAS LUAN FLORENCIO PEREIRA

Graduando em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Brasil. Participa da coordenação do Robotics and Automation Society IEEE-RAS IFBA, auxiliando nos processos de desenvolvimento de competições robóticas. Possui interesse de pesquisa na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Aprendizado de Máquinas, Motores Elétricos e Geração de Energia.

MARIÂNGELA CATELANI DE SOUZA

Docente nos cursos de Administração de Empresas, Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas e Sistemas de Informação, nas áreas de Tecnologia da Informação, Engenharia de Software, Gerenciamento de Serviços de TI, Gestão de Projetos,Qualidade e Requisitos de Software, entre outras. Atua como Consultora de processos de TI no mercado de trabalho, dando ênfase nos processos de gerenciamento de Projetos, Mapeamento e Modelagem de Processos com uso de ferramentas como BPMN, MPS-Br, SCRUM, ITIL, COBIT e Six Sigma

MARINA DA CUNHA SIEBEN

Estudante do curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia - UERGS em Santa Cruz do Sul

MIKELLY BONFIM ANJOS

Graduada em Gestão Empresarial pela Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo (FATEC) - campus Sertãozinho e Graduanda em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação Ciências e Tecnologia da Bahia (IFBA) - campus Vitória da Conquista. Trabalhou em duas microempresas exercendo a função de Assistente Administrativo, atuando principalmente nas áreas de Gestão de Recursos Humanos e Gerenciamento Financeiro, e na função de Gerente Administrativo respectivamente. Atualmente é estagiária do setor de fechamento de obras na empresa Sino Eletricidade LTDA, é membro do Programa de Educação Tutorial - PET Engenharias, onde desenvolve atividades relacionadas ao ensino, pesquisa e extensão, da Empresa Junior de Engenharia Elétrica (EJEEL) atuando no setor comercial e do Diretório Acadêmico de Engenharia Elétrica, onde atua na coordenação financeira.

MÔNICA BEATRIZ KOLICHESKI

Dra. em Engenharia pelo PIPE | UFPR. Profa. do curso de Engenharia Química | UFPR. Profa. do curso de pós graduação em Meio Ambiente Industrial e Urbano | UFPR.

NATHAN GOUVEIA TAMAROZZI

Engenheiro de Produção, Unirp, 2022.

SAIDE KAHTOUNI

Especialista em Gestão e tecnologias ambientais pela Escola Politécnica da USP, 1998, Doutora pela USP em Teoria, Fundamentos e História da Arquitetura e Urbanismo (2003), Mestre em Paisagem e Ambiente FAUUSP (1993), Pós-Doutorado pela UFRJ-PROURB – Programa de pós-graduação em

AUTORES

Urbanismo com Bolsa da FAPERJ (2011). Além de ter sido docente universitária por mais de 20 anos, é Pesquisadora Doutora sênior no Grupo de Pesquisa PAISA/UFRJ até a presente data e membro do Grupo de pesquisa POLI-USP/PRO CONECTICIDADE. Autora de diversos livros a artigos científicos, tendo publicado recentemente na Inglaterra a obra "São Paulo, a city of water, tradução e atualização do seu livro Cidade das águas (2004).

SÉRGIO GILBERTO BECKER

Estudante do curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia - UERGS em Santa Cruz do Sul

SHADIA S. ASSAF BORTOLAZZO

Coordenadora de Projetos de Engenharia de Transportes no Grupo Arteris S.A. Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC (2015-2017). Especialista em Gestão Estratégica do Território Urbano pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS (2011-2012). Engenheira Civil graduada pela Universidade Federal de Santa Maria - UFSM (2003-2007). Áreas de atuação: Planejamento e gestão de projetos de engenharia de transportes, eficiência energética em sistemas de transportes, desenvolvimento de projetos de infraestrutura de transportes, gestão e liderança em projetos e equipes multidisciplinares.

SOPHIA VICTÓRIA SANTOS

Formada em Engenharia Elétrica pela UFERSA.

VANDERLI CORREIA PRIETO

Pós-doutorado pela Universidade de São Paulo (USP) - Engenharia de Produção, Doutora e Mestre em Engenharia de Produção pela mesma instituição. Mestre em Administração de Empresas pela Universidade Paulista (UNIP), Pós Graduada em Tecnologia Educacional pela FAAP. Administradora de Empresas pela Universidade de Taubaté. Professora Associada na Universidade Federal do ABC, Curso de Engenharia de Gestão, no Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas - CECS. Orientadora no Mestrado em Engenharia de Produção. Pesquisadora com interesse pelos seguintes temas: sustentabilidade, alinhamento estratégico, implementação de estratégias, inovação em modelos de negócios. Vivência na consultoria de empresas nas áreas de qualidade e gestão organizacional e no exercício de atividades em empresas privadas, dentre elas a Volkswagen do Brasil.

VICTOR LUIZ LOPES

Engenheiro de Produção, Unirp, 2022.

WILLIAM MORAES DE ASSIS

Engenheiro de Produção, Unirp, 2022.

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br

@editorapoisson

https://www.facebook.com/editorapoisson